

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



**O BALANÇO RADIATIVO DE UM CONJUNTO DE EDIFÍCIOS EM
TELHEIRAS COM RECURSO A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

MÁRCIA ALEXANDRA NEVES MATIAS

Dissertação orientada pelo
Professor Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2018

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



O BALANÇO RADIATIVO DE UM CONJUNTO DE EDIFÍCIOS EM TELHEIRAS COM RECURSO A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

MÁRCIA ALEXANDRA NEVES MATIAS

Dissertação orientada pelo
Professor Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Júri:

Presidente: Professor Doutor Marcelo Henrique Carrapito Martinho Fragoso do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.

Vogais:

- Professor Doutor Miguel Centeno da Costa Ferreira Brito do Departamento de Engenharia Geográfica Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;

- Professor Doutor António Manuel Saraiva Lopes do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.

2018

Agradecimentos

Ao longo dos últimos meses várias pessoas contribuíram, de diferentes formas, para que esta dissertação chegasse a bom porto. Aqui deixo os meus agradecimentos:

Ao Professor António Lopes, muito obrigada. Sem a sua ajuda durante os meses que passaram e os seus comentários, que em muito contribuíram para a melhoria da tese em geral, não estaríamos aqui hoje. O meu sincero agradecimento, pelo entusiasmo e por me incentivar, mesmo quando as coisas demoravam mais do que o previsto e não correram como imaginávamos.

Um agradecimento aos professores que, durante o meu percurso académico, contribuíram para a pessoa que hoje sou. Pela ajuda no crescimento, não só académico, como pessoal.

Deixo aqui também um especial agradecimento à Arquiteta Paula Mâncio e ao Sr. Joaquim Marques do Departamento de Operações da Divisão de Iluminação Pública da Câmara Municipal de Lisboa, pela disponibilidade para a instalação dos aparelhos climáticos na área de estudo.

Aos meus amigos, Ana Gonçalves, Sara Lopes, Andry Castro e Ana Teves, muito obrigada. Pelos bons momentos que passámos, pelas gargalhadas, pela partilha e companhia mas, acima de tudo, pelo incentivo nos momentos menos bons destes últimos meses. Obrigada pela troca de comentários inteligentes e sugestões que me salvaram tempo essencial na última fase desta dissertação. Sem vocês os meses que levei a escrever não teriam sido, com toda a certeza, tão bons. Obrigada também aos meus outros amigos com quem não passei tanto tempo durante estes meses mas, que mesmo assim, tiraram parte do seu tempo para saber como estava o andamento da tese e para me incentivar.

À minha família, porque sem eles não teria conseguido, de todo, chegar ao fim. À minha avó gostaria de deixar o meu mais sincero pedido de desculpas, pelo tempo que faltou, por me ter empenhado nesta dissertação e, por vezes, ter delgado do resto do mundo.

Aos meus pais por terem contribuído para dar mais um passo na minha formação académica. Para sempre ficarei agradecida por ter tido (mais) esta oportunidade. Esta dissertação também é vossa. Ao meu pai, em particular, pela preocupação em saber se estava tudo “a andar” e por se oferecer sempre para tudo o que precisei. À minha mãe por nunca ter deixado que desmotivasse quando as coisas não estavam bem e por puxar por mim, obrigando-me por vezes a sair da minha zona de conforto, não deixando que as coisas fossem simplesmente como são, muito obrigada. Obrigada, ainda, pela leitura cuidada e atenta de alguns dos capítulos da dissertação. Aos dois, obrigada pela paciência nestes últimos meses. Não foi fácil para mim, imagino para vocês.

À Bruna, a melhor irmã que alguém poderia ter, muito obrigada. Não só pela ajuda que me deu no trabalho de campo mas também pelo companheirismo e por querer sempre saber como as coisas estavam. Obrigada por queres sempre ajudar, mesmo não sabendo bem como. Obrigada pela cuidada leitura inicial da dissertação, os teus comentários também contribuíram para a melhoria do texto.

A todos, *muito obrigada*.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivos calcular o balanço radiativo de um conjunto de fachadas em Telheiras (Lisboa), obter imagens térmicas das fachadas dos edifícios em estudo, através da termografia infravermelha, compreender de que forma as temperaturas registadas nas fachadas e superfícies da área de estudo afetam as temperaturas do ar registadas no *canyon* urbano, perceber de que modo os valores do balanço radiativo registados nas fachadas e diferentes superfícies influenciam as temperaturas do ar e comparar os valores obtidos através do modelo micrometeorológico *ENVI-met* com as observações realizadas em campo. Para atingir estes objetivos foram calculadas as temperaturas de superfície, através de imagens de satélite, procedeu-se à instalação de uma rede microclimática na área de estudo, para a monitorização da temperatura e humidade relativa do ar, e com recurso a uma câmara térmica FLIR, foram recolhidas as temperaturas de superfície das fachadas e respetivos materiais. Foi igualmente calculado o balanço radiativo destas superfícies e das fachadas dos diferentes edifícios com recurso a um piranómetro e a um pirgeómetro. Os valores observados foram comparados com os resultados obtidos na modelação tridimensional, através do cálculo das diferenças entre os valores observados em campo e os estimados pelo modelo. Os resultados obtidos mostram que os locais mais expostos à direção predominante do vento (norte e noroeste) apresentam temperaturas do ar relativamente mais baixas do que os que se encontram em abrigo (ruas perpendiculares a essa direção). Tanto a temperatura como o balanço radiativo das fachadas e outras superfícies (asfalto, calçada portuguesa de cor clara e pavimento em azulejo) respondem diretamente à radiação solar incidente. São as fachadas expostas a sul onde se verificam sempre as temperaturas mais elevadas das quatro exposições em estudo. As temperaturas e o balanço radiativo mais elevado são quase sempre registados no asfalto. O modelo *ENVI-met*, utilizado para a modelação tridimensional de diferentes variáveis recolhidas em campo conseguiu, de certa forma, modelar corretamente a variação diurna da temperatura do ar no *canyon* urbano. Relativamente à temperatura das fachadas e ao balanço radiativo destas superfícies, o modelo 3D estima valores superiores aos observados em campo, maioritariamente, quando as fachadas se encontram a receber radiação solar. Este estudo tem um cariz totalmente inovador em Portugal, sendo necessário prosseguir a investigação noutras áreas de estudo e períodos do ano, de modo a encontrar soluções de materiais que possam ajudar a mitigar o efeito de ilha urbana de calor de Lisboa.

Palavras-chave: termografia infravermelha; balanço radiativo; *ENVI-met*; IUC; superfícies urbanas.

Abstract

This work aims to understand the radiation balance (Q^*) of a group of façades in Telheiras (Lisbon) and compare the results with atmospheric temperatures measured in an urban canyon in this neighborhood. A set of thermal images of these façades were obtained using an infrared thermograph camera (FLIR) and Landsat 8 satellite images were obtained to complement the study. This thermography allowed to understand how the temperatures registered in the façades and other urban surfaces affect the air temperature of the urban canyon. The components of the radiation budget were obtained by using a pyranometer and a pyrgeometer. The values were compared with the results of a micrometeorological model (ENVI-met), to validate these results and extent punctual data to the surfaces. To reach the main goals, a microclimatic network to monitor air temperature and relative humidity was installed in Telheiras. The results show that when the streets are more exposed to the prevailing wind direction in Lisbon (North and Northwest), air temperatures is slightly higher than those found in opposite conditions. Both the temperature and the radiative balance of the façades and other surfaces (asphalt, light Portuguese sidewalk and tile floor) respond directly to incident solar radiation. As expected, it was found that south façades have the highest temperatures of the four exposures under study and the highest radiative balance were always recorded on asphalt. The ENVI-met model, used for the three-dimensional modeling of different variables collected in the field, was able, in some way, to correctly model the diurnal variation of air temperature in the urban canyon. Regarding the temperature of the façades and the radiative balance of these surfaces, the 3D model estimates higher values than those observed in the field, mostly when the façades are receiving solar radiation. This work is innovative in the way it is the first attempt to integrate all components of this complex system in an urban canyon in the region and to understand which materials are more adequate to mitigate urban heat island effect in Lisbon.

Keywords: infrared thermography; radiation balance; ENVI-met; UHI; urban surfaces.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de figuras	ix
Índice de quadros	xi
Capítulo I – Introdução	1
1.1. Relevância do tema	1
1.2. Enquadramento e caracterização da área de estudo	3
1.3. Objetivos e estrutura da dissertação	7
Capítulo II - Balanço radiativo em ambiente urbano	9
2.1. Introdução	9
2.2. Componentes de pequeno comprimento de onda (K)	11
2.3. Componentes de grande comprimento de onda (L)	12
2.4. Breve apresentação teórica da termografia infravermelha	13
2.4.1. A medição da radiação infravermelha com instrumentação portátil	15
2.4.2. A interpretação dos termogramas	16
2.4.3. Vantagens e limitações da termografia de proximidade.....	17
2.4.4. Aplicações da termografia.....	18
Capítulo III - O clima da região de Lisboa e medidas de mitigação da IUC	21
3.1. O clima urbano de Lisboa	21
3.1.1. As ilhas de calor e as ilhas de frescura urbanas	25
3.2. Medidas para a mitigação da IUC	30
Capítulo IV – Metodologia	35
4.1. Introdução	35
4.2. Cálculo das temperaturas de superfície: análise de mesoescala	37
4.2.1. Breve descrição das características do satélite Landsat 8	37
4.2.2. Aquisição das imagens térmicas.....	38
4.2.3. Metodologia para a obtenção das LST	38
4.3. Monitorização da temperatura do ar em meio urbano.....	41
4.4. Registo das temperaturas de superfície das fachadas	43
4.4.1. Tratamento e análise das imagens térmicas	46
4.5. Cálculo do balanço radiativo das fachadas e superfícies da área de estudo.....	46
4.5.1 Calibração do radiómetro	49
4.6. Modelação micrometeorológica tridimensional (ENVI-met)	51
4.6.1. O balanço radiativo e a temperatura das fachadas da área de estudo	52
Capítulo V - Resultados	55
5.1. Análise das temperaturas de superfície obtidas com o satélite Landsat 8	55
5.1.1. Lisboa.....	55
5.1.2. Lumiar/Telheiras	57
5.2. As temperaturas das fachadas e outras superfícies da área de estudo	57
5.2.1. Análise das temperaturas de superfície (inverno)	57
5.2.2. Análise das temperaturas de superfície (primavera)	60
5.2.3. Análise das temperaturas de superfície (verão).....	62
5.2.4. A temperatura de outras superfícies na primavera e no verão.....	65

5.3. Balanço radiativo (Q^*) das fachadas e superfícies urbanas	69
5.4. Modelação tridimensional com o ENVI-met	70
5.4.1. Temperatura do ar	71
5.4.2. Temperatura das fachadas	72
5.4.3. O balanço radiativo das fachadas	73
Capítulo VI – Validação dos resultados	75
6.1. Temperatura do ar	75
6.2. Temperatura de superfície das fachadas.....	76
6.3. Balanço radiativo das fachadas	77
6.4. Conclusões	79
Capítulo VII – Discussão de resultados	81
7.1. Temperaturas de superfície (T_s) com imagens de satélite.....	81
7.2. Temperatura do ar no canyon urbano.....	82
7.3. Termografia infravermelha: as temperaturas das fachadas e outras superfícies	85
7.4. O balanço radiativo das fachadas e superfícies do canyon urbano	87
Capítulo VIII - Conclusões	89
Referências bibliográficas.....	93

Índice de figuras

Figura 1 - Posição geográfica do concelho de Lisboa.....	3
Figura 2 - Localização da área de pormenor (Rua Professor Simões Raposo)	5
Figura 3 – Conjuntos de edifícios e exposição das fachadas em estudo.	6
Figura 4 - Balanço radiativo diurno e noturno	10
Figura 5 - Espectro eletromagnético	15
Figura 6 - Espectro eletromagnético parcial.....	15
Figura 7 – Divisões na escala horizontal de análise dos fenómenos climáticos em áreas urbanas	22
Figura 8 – Relação entre a intensidade máxima da Ilha Urbana de Calor e a relação H/W nos canyons urbanos	27
Figura 9 – Classificação dos tipos de ilha urbana de calor mais comuns e exemplos de como estas podem ser estudadas	28
Figura 10 – Esquema-síntese das metodologias.....	36
Figura 11 - Metodologia de Ndossi e Avdan (2016) para o cálculo das Ts	39
Figura 12 - Interface para a utilização do Atmospheric Correction Parameter Calculator e exemplo de output	41
Figura 13 - Esquema da rede microclimática instalada na área de estudo	42
Figura 14 - Registador automático da temperatura do tipo Hobo Pro V2.....	42
Figura 15 - Instrumento instalado na área de estudo.....	43
Figura 16 - Câmara térmica FLIR - Modelo B425.....	44
Figura 17 - Tripé utilizado para a recolha de termogramas.....	45
Figura 18 – Esquema do registo das temperaturas de superfície nas fachadas	45
Figura 19 – Radiómetro composto por um piranómetro e um pirgeómetro.....	46
Figura 20 - Diagrama solar da área de estudo para determinação da hora de máxima elevação do sol.....	47
Figura 21 - Variação da área ocupada por sombra na área de estudo ao longo do dia.....	47
Figura 22 - Localização dos pontos onde foram registadas as componentes do balanço radiativo	49
Figura 23 - Correlação entre os dados recolhidos com o piranómetro e os valores registados pela estação meteorológica do IGOT (25, 27, 28 de junho e 5 de julho de 2018).....	50
Figura 24 - Correlação entre os dados recolhidos com o pirgeómetro e os valores recolhidos com o termómetro infravermelho térmico (28 de junho e 5 de julho de 2018).....	51
Figura 25 - Modelo da área de estudo a 2 dimensões	53
Figura 26 - Pormenor de uma das fachadas do modelo 3D para o desenho das janelas	53
Figura 27 - Modelo da área de estudo a 3 dimensões (ENVI-met).....	54
Figura 28 - Temperaturas de superfície para o concelho de Lisboa calculadas com base em imagens Landsat 8.....	56
Figura 29- Temperaturas de superfície para a freguesia do Lumiar e área de pormenor calculadas com base em imagens Landsat 8	58
Figura 30 - Imagem térmica de inverno da fachada sul e histograma correspondente	59
Figura 31 - Imagem térmica de inverno da fachada este e histograma correspondente	59
Figura 32 - Imagem térmica de inverno da fachada oeste e histograma correspondente	60
Figura 33 - Imagem térmica de inverno da fachada norte e histograma correspondente	60
Figura 35 - Imagem térmica na primavera da fachada sul e histograma correspondente	61
Figura 34 - Imagem térmica na primavera da fachada norte e histograma correspondente	61
Figura 36 - Imagem térmica na primavera da fachada oeste e histograma correspondente	61
Figura 37 - Imagem térmica da fachada este no período da primavera e histograma correspondente	62
Figura 39 - Imagem térmica de verão da fachada norte (19h) e histograma correspondente.....	63

Figura 38 - Imagem térmica de verão da fachada sul (15h) e histograma correspondente	63
Figura 40 - Imagem térmica de verão da fachada oeste (15h) e histograma correspondente.....	64
Figura 41 - Imagem térmica de verão da fachada este (13h) e histograma correspondente.....	65
Figura 42 - Imagem térmica do asfalto na primavera à tarde (15h) e histograma correspondente	65
Figura 43 - Imagem térmica do pavimento na primavera à tarde e histograma correspondente.....	66
Figura 44 - Imagem térmica do calçada na primavera à tarde e histograma correspondente.....	66
Figura 45 – Balanço radiativo das fachadas este e oeste e da área de estudo (7 de julho de 2018)	69
Figura 46 – Temperaturas horárias estimadas com o ENVI-met nos 6 recetores (primavera, dia 18 de junho de 2018).....	71
Figura 47 - Temperaturas horárias estimadas com o ENVI-met nos 6 recetores (verão, dia 7 de julho de 2018)	72
Figura 48 - Temperatura média das fachadas calculada com recurso ao ENVI-met	73
Figura 49 – Q* das fachadas este e oeste modeladas através do ENVI-met.....	74
Figura 50 - Diferença entre os valores estimados e os valores observados em campo (temperaturas médias horárias do ar - °C) no mês de junho.....	75
Figura 51 - Diferença entre os valores estimados e os valores observados em campo (temperaturas médias horárias do ar - °C) no mês de julho.....	75
Figura 52 - Valores obtidos com o radiómetro e os estimados pelo modelo 3D relativamente ao balanço radiativo das fachadas	78
Figura 53 – Diferença entre os valores obtidos em campo e os estimados pelo modelo para o balanço radiativo das fachadas	78
Figura 54 – Médias horárias das temperaturas do ar (°C) nas duas áreas do canyon urbano com exposições opostas em abril (a), maio (b), junho (c) e julho (d).....	84

Índice de quadros

Quadro 1 - Percentagem das fachadas coberta por diferentes cores e materiais	6
Quadro 2 - Principais aplicações da termografia infravermelha	18
Quadro 3 - Orientações climáticas para a Lisboa à escala microclimática	33
Quadro 4 - Softwares utilizados e respetiva finalidade	37
Quadro 5 - Datas das missões Landsat.....	38
Quadro 6 - Datas das imagens de satélite recolhidas para o cálculo das temperaturas de superfície (<i>Land Surface Temperature</i> – LST)	38
Quadro 7 – Parâmetros recolhidos durante as idas ao campo	44
Quadro 8 - Variação da altura do sol ao longo do dia.....	48
Quadro 9 - Características para o desenho do modelo 3D no ENVI-met	52
Quadro 10 - Condições iniciais para a modelação no ENVI-met	54
Quadro 11 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada sul ao longo do dia no período de verão.....	62
Quadro 12 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada norte ao longo do dia no período de verão.....	63
Quadro 13 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada norte ao longo do dia no período de verão.....	64
Quadro 14 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada oeste ao longo do dia no período de verão.....	64
Quadro 15 - Temperaturas registadas na calçada (verão)	68
Quadro 16 - Temperaturas registadas no asfalto (verão).....	68
Quadro 17 - Temperaturas registadas no pavimento (verão)	68
Quadro 18 - Diferença de temperaturas entre o asfalto e a calçada	68
Quadro 19 - Diferença de temperaturas entre o asfalto e o pavimento	68
Quadro 20 – Diferença de temperaturas entre a calçada e o pavimento.....	68
Quadro 21 - Componentes do balanço radiativo calculadas para as fachadas este e oeste e para a área de estudo (W m^{-2})	70
Quadro 22 – Q^* dos diferentes materiais utilizados nas superfícies da área de estudo (W m^{-2}). 70	
Quadro 23 - Temperatura média das fachadas modelada no ENVI-met para o dia 21 de fevereiro e para o dia 18 de junho de 2018.....	72
Quadro 24 - Diferença entre as temperaturas médias de superfície estimadas pelo modelo e observadas em campo (termografia infravermelha) para cada fachada da área de estudo no verão	77

Capítulo I – Introdução

1.1. Relevância do tema

As alterações climáticas são atualmente um tema mediático e debatido em todo o mundo. As inúmeras projeções e cenários de um aquecimento global futuro confrontam a população com a necessidade de mitigação e adaptação a este fenómeno. De acordo com o relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), o *Fifth Assessment Report* (AR5), a influência do Homem no sistema climático é clara e indiscutível. Nas últimas décadas registaram-se emissões de gases com efeitos de estufa muito mais elevadas que contribuíram para o aumento das temperaturas do ar. O IPCC afirma que as últimas três décadas foram as mais quentes quando comparadas com todas as anteriores desde 1850 (IPCC, 2014).

Segundo as projeções desta organização é esperado um aumento da temperatura de superfície durante o século XXI. Em 2013, o IPCC projetava que a temperatura terrestre, no final do século XXI, aumentará entre 1,5°C e 5°C, em relação ao período 1850-1900, em todos os cenários climáticos. Ainda, nas projeções apresentadas, espera-se que os episódios de onda de calor ocorram cada vez com maior frequência e tenham maior duração (IPCC, 2014).

No entanto, é preciso chamar a atenção para as incertezas ligadas com a magnitude, as causas e também para a variabilidade regional e particularidades locais que este aquecimento global terá. Todas as áreas são diferentes e têm respostas particulares, que dependem das características de cada local.

Nas últimas décadas a população mundial aumentou significativamente. O êxodo rural levou milhões de pessoas a deixarem os espaços rurais para viverem em áreas urbanas. De acordo com as Nações Unidas (2015), desde 1950 a população urbana mundial passou de 746 milhões para 3,9 mil milhões em 2014. As projeções apontam para que este número tenha um aumento de 2,5 mil milhões até ao ano de 2050.

Em Portugal, a população urbana representava, em 2014, mais de 63% da população total, equivalente a mais de 6,675 milhões de residentes em áreas urbanas. Em 2050, as Nações Unidas estimam que este valor aumentará para 7,564 milhões (77% da população total).

O rápido aumento da população urbana implicou um acelerado desenvolvimento das cidades que se expandiram tanto na horizontal como na vertical. Hoje as áreas urbanas são de muito maior dimensão e com infraestruturas cada vez mais altas. As chamadas “megacidades”, com mais de 10 milhões de habitantes, estão a crescer em número (Nações Unidas, 2015) e espera-se que este aumento seja ainda maior no futuro. O aumento da população e o desenvolvimento das cidades levou a uma consequente alteração do uso e ocupação do solo, que afetou o

armazenamento e a transferência radiativa de calor em meio urbano, afetando o balanço de energia das cidades. Estas alterações traduziram-se, essencialmente, em mais áreas edificadas, mais áreas pavimentadas, menos áreas ocupadas por espaços verdes e vegetação e mais poluídas.

A rápida urbanização não trouxe apenas novas pessoas para as áreas urbanas. As novas construções e o arranjo dos diversos locais dentro das cidades modificaram gradualmente o ambiente físico urbano segundo Ren *et al.*, 2010, citados por Marques (2012) criando um clima urbano próprio de cada cidade, com características singulares e que devem ser estudadas como casos únicos. Assim, os estudos do clima urbano devem ser feitos para cada cidade, compreendendo as suas características, físicas e ambientais, tanto à mesoescala, como à microescala.

O crescente interesse pelo estudo do ambiente urbano e sobre os seus aspetos climáticos, deve-se à importância demográfica, económica, social e cultural que as áreas urbanas têm na atualidade (Andrade, 2003).

O clima urbano resulta das modificações que as superfícies materiais e as atividades urbanas induzem no balanço energético da cidade. Um dos fenómenos mais conhecidos e estudados sobre o clima das áreas urbanas, e uma das consequências do aquecimento urbano, é a Ilha Urbana de Calor. Este fenómeno tem sido muitas vezes associado com o aquecimento global mas nem sempre é estudado de forma fundamentada (Alcoforado *et al.*, 2008).

Tal como muitas outras cidades, Lisboa lida diariamente com a pressão contínua de uma urbanização que aumentou rapidamente nas últimas décadas. O rápido crescimento populacional e o desenvolvimento urbano que esta cidade conheceu transformaram o ambiente natural em áreas densamente edificadas que vieram alterar profundamente o clima desta região.

As modificações induzidas pelo crescimento urbano no clima de Lisboa foram já alvo de estudo por Lopes (2003). A grande maioria dos trabalhos sobre o clima de determinadas regiões foca-se nas escalas local e regional, não entrando em grande detalhe sobre os microclimas que compõem o clima urbano da cidade.

A monitorização das áreas urbanas e das alterações que estas sofreram é importante para compreender a sua influência nos diferentes parâmetros ambientais mas também para entender as modificações que induzem nos balanços de energia e radiação destas áreas.

Pretende-se assim continuar a investigação, subindo de escala, estudando um dos muitos microclimas de Lisboa, percebendo de que forma as tipologias urbanas e os tipos de materiais utilizados na cidade contribuem para a alteração do clima regional e para a formação de fenómenos climáticos como a Ilha Urbana de Calor (IUC), sobretudo no contexto das alterações climáticas.

1.2. Enquadramento e caracterização da área de estudo

A cidade de Lisboa está localizada na faixa ocidental de Portugal continental, a uma latitude de aproximadamente 38° 42' N e a uma longitude de 9° 10' W, conferindo-lhe uma posição geográfica muito particular (fig. 1).

A cerca de 30km do oceano Atlântico, na margem norte do estuário do Tejo, Lisboa apresenta características topográficas particulares, de onde se destaca a Serra de Monsanto, com altitudes superiores a 200 m. A este da Serra estende-se um planalto, frequentemente designado por Planalto de Lisboa (Maria João Alcoforado, 1993), com altitudes compreendidas entre os 80 e os 100 m, valores que diminuem em direção ao rio Tejo. Para Norte esta superfície apresenta alguns vales largos (Campo Grande, Avenida Gago Coutinho, Benfica). Com a aproximação ao rio, esta superfície começa a apresentar-se mais degradada e cortada por vales estreitos e encaixados, com orientação norte-sul (Andrade, 2003) e vertentes de forte declive. A sul, junto ao Tejo, o relevo apresenta-se mais acidentado e com alguns interflúvios pouco extensos, onde as altitudes não ultrapassam os 100 m (Maria João Alcoforado, 1993).

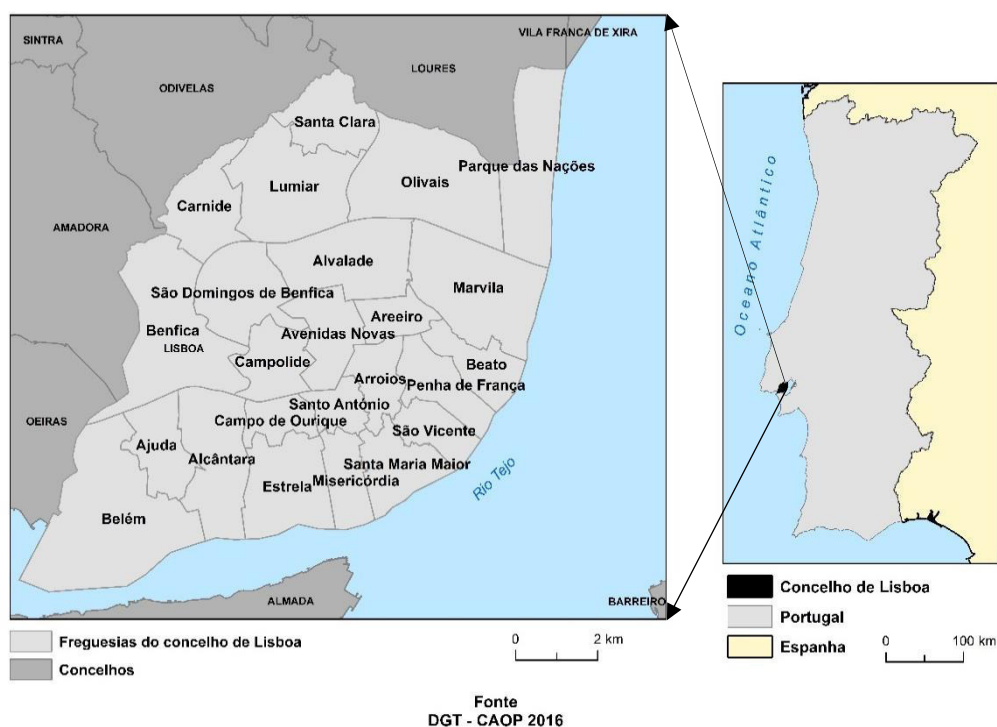


Figura 1 - Posição geográfica do concelho de Lisboa

Atualmente, o concelho de Lisboa apresenta uma morfologia urbana heterogénea, que resultou das várias fases de crescimento urbano do concelho traduzindo o modo e a época em que se construíram. No sul da cidade de Lisboa, junto ao Tejo, subsiste, até aos dias de hoje, um núcleo central mais antigo, correspondente à parte mais antiga da cidade. Aqui a ocupação pelo

edificado é mais densificada e expandiu-se para a área de Alfama até à Baixa (Morais, 2011; Salgueiro, 2002).

Este tecido urbano evidencia, claramente, a influência da topografia acidentada na expansão da malha urbana sinuosa, com ruas muito estreitas e densidade de construção muito elevada (Morais, 2011). Após o terramoto de 1755 a Baixa foi reconstruída sob um traçado retilíneo de ruas alinhadas, caracterizado por ruas longitudinais norte/sul e transversais este/oeste (Lopes, 2003; Moraes, 2011).

No início do século XIX surgiu um novo desenvolvimento do território de Lisboa com a abertura das Avenidas da Liberdade e Almirante Reis. A expansão da cidade passou a fazer-se então para norte, a partir da Baixa para o “Planalto de Lisboa”, alterando-se a forma da cidade para uma estrutura radiocêntrica (Lopes, 2003; Moraes, 2011).

Após a 2ª Guerra Mundial a construção de vários eixos de saída e entrada na cidade em direção a norte veio, mais uma vez, demonstrar a influência da topografia na expansão urbana, uma vez que estas vias de comunicação progrediram, essencialmente, ao longo dos vales.

No final do século XX deu-se o aparecimento de novas urbanizações nas áreas mais periféricas de Lisboa como o bairro de Telheiras, a urbanização do Alto do Lumiar e, a oriente, o Parque das Nações. Também noutros concelhos limítrofes como Oeiras, Amadora, Loures, Sintra e Cascais surgiram novas urbanizações, com a criação de vários outros eixos de saída e entrada na cidade (Lopes, 2003; Moraes, 2011).

De uma forma geral é possível afirmar que o crescimento urbano de Lisboa foi feito de forma não planeada. Segundo Lopes (2003) o crescimento urbanístico recente tem sido efetuado de forma desajustada, sem que se faça primeiro um planeamento prudente com vista às consequências ambientais que daí podem resultar.

Tal como foi referido anteriormente pretende estudar-se um microclima do concelho de Lisboa. A escolha da área de estudo baseou-se em dois critérios:

- Dado que um dos objetivos seria obter imagens térmicas a área de estudo deveria ser ampla e sem obstáculos;
- A área escolhida devia representar o típico *canyon* urbano que é possível encontrar hoje na parte norte do concelho de Lisboa que, como se viu anteriormente, se expandiu mais recentemente e ao mesmo tempo representar o tipo de construção atual.

Assim, cumprindo os requisitos acima referidos, e depois de ter sido realizada uma inspeção, através de ortofotomapas em todo o concelho de Lisboa, a área de estudo escolhida foi a Rua Professor Simões Raposo, em Telheiras, na freguesia do Lumiar (fig. 2).

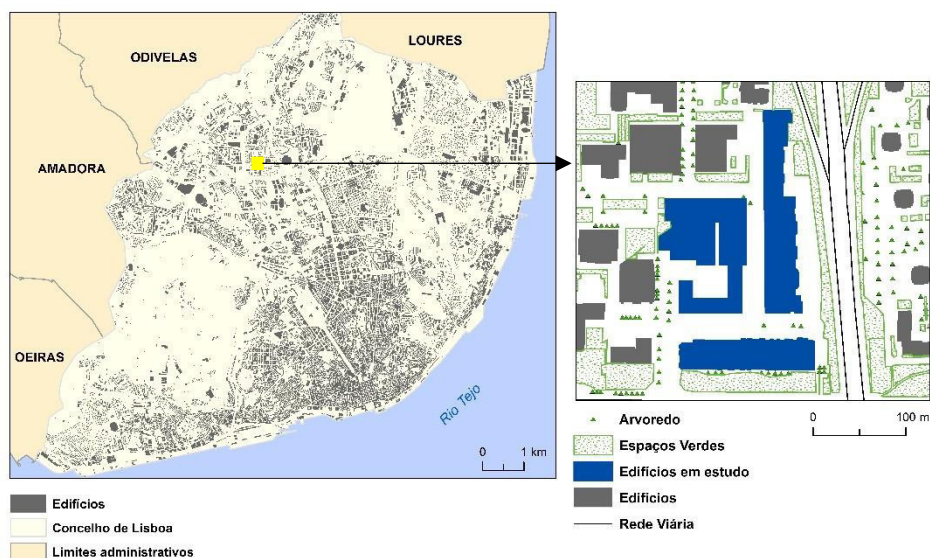


Figura 2 - Localização da área de pormenor (Rua Professor Simões Raposo)

Ao longo de toda a rua existem duas áreas distintas que serão alvo de estudo. A área 1 (fig. 3) apresenta um comprimento de 245 metros e cerca de 34 metros de largura, com orientação Norte-Sul. A área 2 (fig. 3) tem um comprimento ligeiramente inferior, com 152 metros e 17 de largura, com orientação este-oeste.

Os edifícios em estudo apresentam algumas diferenças entre si:

- O conjunto de edifícios 1, apresenta alturas compreendidas entre os 24 e os 33 metros. Neste conjunto foi calculado o balanço radiativo e foram recolhidas imagens térmicas das fachadas este e a sul (fig. 3);
- O conjunto 2, cuja fachada em estudo tem exposição a oeste apresenta, também, alturas compreendidas entre os 24 e os 33 metros;
- A altura dos edifícios do conjunto 3, cuja fachada em estudo é a norte, variam entre os 27 e os 33 metros.

Apresenta-se no quadro 1 uma caracterização breve das cores das fachadas dos diferentes edifícios, que variam entre o branco, o rosa e o cinzento. Apresenta-se a percentagem que cada cor ocupa nas fachadas dos diferentes conjuntos de edifícios, assim como, a percentagem da fachada ocupada por janelas.

Quadro 1 - Percentagem das fachadas coberta por diferentes cores e materiais

Conjunto de edifícios	Exposição da fachada	Rosa	Branco	Cinzentos	Janelas
1	Este	36,7	39,8	-	23,5
	Sul	80	5	-	15
2	Oeste	52	39	-	9
3	Norte	70	10	5	15

A vegetação na área de estudo é praticamente inexistente. Porém, é possível encontrar algumas árvores de pequeno porte assinaladas área 2 (fig. 3). No entanto, não constituíram nenhum entrave à recolha de imagens térmicas. Existem também alguns canteiros na área de estudo que não representaram nenhum problema para a recolha de imagens, uma vez que a vegetação tem pouca altura.

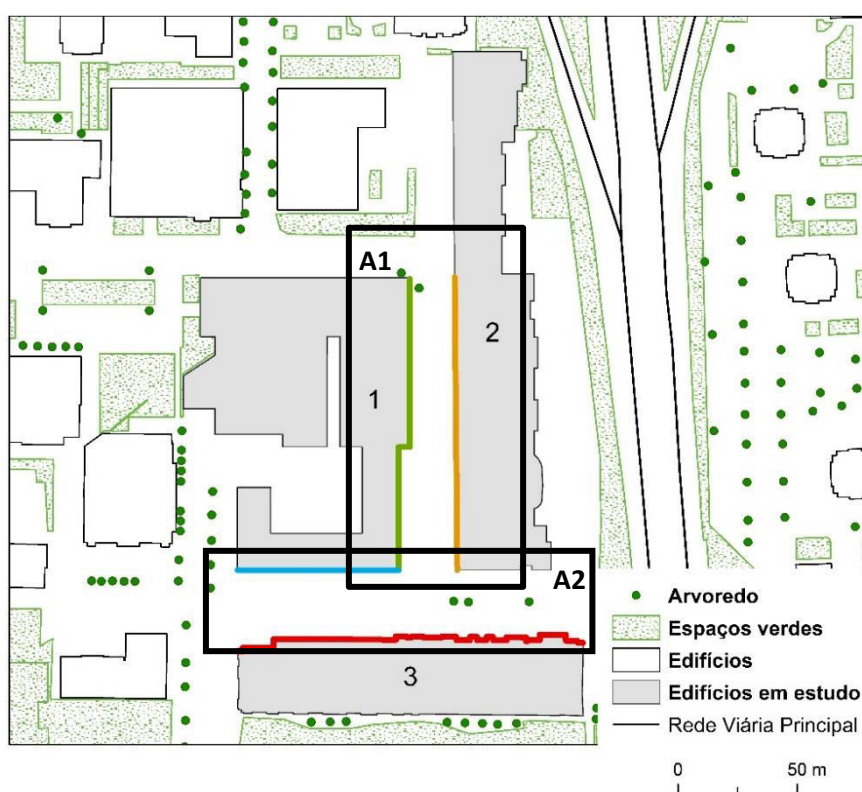


Figura 3 – Conjuntos de edifícios e exposição das fachadas em estudo.
A1 – área 1 e A2 – área 2. A azul –sul; a vermelho – a norte; a verde – a este e a laranja – a oeste.

1.3. Objetivos e estrutura da dissertação

Os objetivos desta dissertação são:

- Calcular o balanço radiativo de um conjunto de fachadas em Telheiras (Lisboa);
- Obter imagens térmicas das fachadas dos edifícios em estudo, através da termografia infravermelha;
- Compreender de que forma as temperaturas registadas nas fachadas e superfícies da área de estudo afetam as temperaturas do ar registadas no *canyon* urbano;
- Perceber de que modo os valores do balanço radiativo registados nas fachadas e diferentes superfícies influenciam as temperaturas do ar;
- Correlacionar os valores da temperatura do ar, temperatura de superfície e balanço radiativo obtidos na área de estudo, com os valores obtidos através da modelação tridimensional;

De forma a atingir todos os objetivos propostos e enunciados acima, esta dissertação apresenta a seguinte estrutura:

- No **capítulo I** apresenta-se o tema desta dissertação, assim como, um enquadramento geográfico do concelho de Lisboa e da área de pormenor escolhida para a realização do estudo microclimático;
- O **capítulo II** tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o cálculo do balanço radiativo em meio urbano e apresentar os princípios fundamentais da termografia infravermelha;
- O **capítulo III** faz um enquadramento do clima da região de Lisboa, ao mesmo tempo que aborda os fenómenos climáticos da Ilha de Calor e Ilha de Frescura. Neste capítulo apresentam-se também as principais medidas para a mitigação da Ilha Urbana de Calor, relativamente ao tipo de materiais que são utilizados nas construções das áreas urbanas;
- No **capítulo IV**, a metodologia, apresenta-se primeiro como foi realizado o cálculo das temperaturas de superfície com base em imagens de satélite, posteriormente, descrevem-se os procedimentos para a instalação da rede microclimática que permitiu fazer a monitorização da temperatura do ar em meio urbano na área de estudo e por fim, é apresentada a metodologia utilizada para o cálculo do balanço radiativo das fachadas e da área de estudo;
- O **capítulo V** apresenta os resultados obtidos durante a realização da presente dissertação;

- O **capítulo VI** apresenta uma breve validação dos resultados da modelação tridimensional feita com o ENVI-met, comparando os valores observados em campo com os valores estimados pelo modelo;
- O **capítulo VI** dedica-se à discussão dos principais resultados obtidos;
- O **último capítulo** é dedicado às conclusões desta dissertação e pretende fazer uma avaliação global do trabalho desenvolvido, onde se enumeram, ainda, possíveis trabalhos futuros.

Capítulo II - Balanço radiativo em ambiente urbano

2.1. Introdução

Na presente dissertação, a terminologia utilizada referente ao balanço radiativo em áreas urbanas foi proposta por Oke (2002).

O conceito de balanço energético foi utilizado pela primeira vez no final do século XIX, num estudo sobre o clima térmico do solo realizado por Homén na Finlândia e por Krauss na Baviera. Em 1951, na Suécia, Sundborg introduziu este conceito na climatologia urbana e, na década de setenta do século XX, surgiram os primeiros modelos numéricos para o cálculo do balanço (Lopes, 2003).

Segundo Oke (2002), caso se considere uma superfície plana, homogénea e extensa, onde os fluxos energéticos se resumem à condição de movimentos verticais, o balanço energético pode ser escrito:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \quad \text{Eq. 1}$$

onde Q^* é o balanço radiativo, Q_H e Q_E representam os fluxos turbulentos de calor sensível e latente, respetivamente, e Q_G o fluxo de calor condutivo que entra ou sai do material que constitui a superfície.

Embora o balanço radiativo seja a principal entrada de energia de um sistema, não é o seu resultado final (Lopes, 2003), já que é contrabalançado pelas trocas energéticas entre as superfícies e a atmosfera efetuadas pelos fluxos convectivos de calor sensível, latente e pela condução do calor do, ou para o solo.

Em meio urbano as superfícies são complexas, extensas e heterogéneas e o balanço energético de um volume de ar na camada limite é, segundo Oke (2002), expresso da seguinte forma:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Eq. 2}$$

onde Q_F corresponde aos fluxos de calor antrópico, ΔQ_S traduz o fluxo de calor armazenado no solo e nos edifícios e ΔQ_A diz respeito ao fluxo de advecção horizontal da camada limite. Os restantes termos equivalem aos apresentados na Eq. 1.

De acordo com Alcoforado (1993) o balanço de radiação depende da relação entre a quantidade de radiação em onda curta recebida pela superfície da terra, da radiação refletida, da irradiação terrestre e da contra irradiação da atmosfera. Lopes (2003) diz que o balanço radiativo é a componente mais importante da troca energética que ocorre nas áreas urbanas, por representar a maior fonte de energia disponível nestas áreas. Parlow (2003) afirma que o balanço radiativo é

responsável por controlar os fluxos turbulentos e o armazenamento dos fluxos de calor nos pavimentos e nas infraestruturas urbanas.

Na figura 4 apresenta-se uma esquematização do balanço radiativo diurno e noturno de um sítio plano. Durante o dia, Q^* corresponde à soma das frações individuais de radiação em pequeno e grande comprimento de onda. Pode ser calculado através da equação seguinte:

$$(Q^*) = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Eq. 3}$$

onde $K\downarrow$ representa a radiação solar incidente global (direta e difusa), $K\uparrow$ corresponde à radiação refletida pelas superfícies em pequeno comprimento de onda, $L\downarrow$ representa a radiação emitida pela atmosfera em grande comprimento de onda que é recebida pela superfície e $L\uparrow$ corresponde à radiação emitida pela superfície em grande comprimento de onda.

Durante a noite, uma vez que não há radiação solar incidente, o balanço radiativo noturno traduz-se apenas por:

$$Q^* = L\downarrow - L\uparrow \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Eq. 4}$$

Num determinado local os termos da radiação incidente ($K\downarrow$ e $L\downarrow$) variam muito pouco espacialmente, uma vez que estão dependentes dos movimentos atmosféricos de escala sinótica e das relações geométricas entre a Terra e o Sol (Lopes, 2003). A reflexão terrestre ($K\uparrow$) e a radiação emitida pela superfície ($L\uparrow$) dependem de fatores locais, a primeira, sobretudo, do albedo das superfícies e a segunda da temperatura e da emissividade deles.

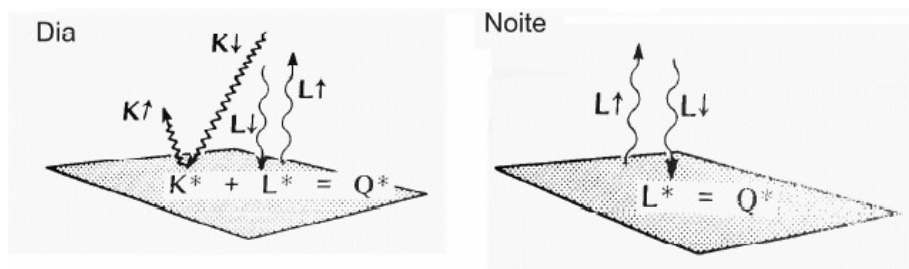


Figura 4 - Balanço radiativo diurno e noturno
Fonte: Oke (2002)

Por ser no cálculo do balanço radiativo que este trabalho se vai concentrar, nos capítulos seguintes apresentam-se as várias componentes deste balanço em meio urbano. Em primeiro lugar, são abordadas as componentes de pequeno comprimento de onda e só depois as de grande comprimento de onda. Em seguida apresentam-se os fundamentos teóricos da termografia infravermelha, dando a conhecer as várias abordagens desta técnica. Faz-se, ainda, uma breve explicação sobre de que forma se podem analisar os resultados, que tipo de fatores influenciam a medição da radiação infravermelha, as vantagens e desvantagens da termografia e as suas diferentes aplicações.

2.2. Componentes de pequeno comprimento de onda (K)

Numa superfície plana as componentes de pequeno comprimento de onda do balanço radiativo são K_{\downarrow} e K_{\uparrow} . Estas componentes são controladas pelo ângulo de azimute e pela altura do sol, ou seja, estão dependentes da localização geográfica dos locais de medição e das condições atmosféricas. Quer isto dizer que o fluxo de radiação eletromagnética que chega a um local da superfície terrestre depende da transmissividade atmosférica e do ângulo de incidência (Miranda (2009), citado por Marques (2012)). A radiação refletida pelas superfícies em pequeno comprimento de onda (K_{\uparrow}) depende da quantidade de energia incidente nas superfícies e do seu albedo:

$$K_{\uparrow} = K_{\downarrow} \cdot \text{alb} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Eq. 5}$$

Para superfícies opacas à radiação em pequeno comprimento de onda, a porção de K_{\downarrow} que não é refletida é absorvida. O balanço radiativo de pequeno comprimento de onda pode escrever-se de duas formas:

$$K^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} \text{ ou } K^* = K_{\downarrow} \cdot (1 - \text{alb}) \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Eq. 6}$$

Nas cidades, a radiação de pequeno comprimento de onda emitida pelo Sol é, segundo Alcoforado (1993), reduzida pela poluição atmosférica urbana, que pode variar entre 5% e 25%. A mesma autora faz ainda referência aos trabalhos de Chandler (1965) e Gazágó (1974) que quantificaram esta perda nas cidades de Londres e Budapeste, respetivamente. Segundo Alcoforado *et al.* (2014), que citam Jaúregui e Luyando (1999), a radiação solar incidente pode ser 30% mais baixa em cidades com elevados níveis de poluição, devido à grande concentração de aerossóis. Contudo, é necessário realçar que os valores variam de cidade para cidade, dependendo das formas urbanas e de outros fatores.

Por outro lado, K_{\downarrow} é normalmente mais baixo nas cidades do que nas áreas envolventes, devido à geometria do *canyon* urbano¹ e do tipo de materiais das superfícies das cidades. Segundo Oke (2002) isto acontece porque há um maior número de superfícies refletoras, dando-se múltiplas reflexões entre as fachadas em áreas com *sky view factor*² (SVF) baixo. Para além destas reflexões, a diversidade de materiais existentes nas cidades, geralmente com baixo albedo, também contribui para a diminuição de K_{\uparrow} , já que é absorvida maior quantidade dessa radiação diminuindo a energia refletida.

¹ Entende-se por *urban canyon* (ou *canyon* urbano) um tipo de geometria urbana composta por uma ou mais ruas, mais ou menos retilíneas ladeadas por edifícios geralmente altos (Lopes, 2006).

² O *sky view factor* (SVF) é a proporção da abóbada celeste visível de um determinado ponto à superfície, em relação à superfície teoricamente disponível. O valor é 1 quando não existe qualquer obstáculo que limite a visão do céu e tende para 0 à medida que se interpõem mais obstáculos que ocultam parcialmente o céu (Grimmond, 2007; Lopes, 2006).

Segundo Alcoforado (1993) a radiação refletida pelas superfícies em pequeno comprimento de onda depende da morfologia urbana e varia em função do albedo das superfícies (que depende da cor e natureza dos materiais), da densidade de construção, da configuração mas também da dimensão e da posição relativa dos prédios e dos espaços verdes existentes nas áreas urbanas. A diminuição do albedo deve-se ao facto de a radiação refletida pelas superfícies não ser perdida na sua totalidade, uma vez que sofre múltiplas reflexões, ficando aprisionada entre os edifícios (Alcoforado, 1993). No caso de Lisboa foi já observado que o albedo é mais baixo nas áreas urbanas, em média 15%, em comparação com as periferias, à exceção da área de Monsanto (Lopes, 2003).

2.3. Componentes de grande comprimento de onda (L)

O balanço radiativo (Q^*) não depende apenas das componentes de pequeno comprimento de onda apresentadas na secção anterior. A radiação emitida pela atmosfera em grande comprimento de onda, efetivamente recebida pela superfície (L_{\downarrow}) depende da temperatura e da emissividade da atmosfera, de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann. É obtida da seguinte forma:

$$L_{\downarrow} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{atm}}^4 \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Eq. 7}$$

onde ε é a emissividade, σ a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$, em $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$) e T_{atm} a temperatura da atmosfera em Kelvin (K).

A emissividade expressa a razão entre a energia radiante emitida por uma superfície, num dado comprimento de onda, e a temperatura e a energia radiante que é emitida por um corpo negro³ nas mesmas condições. Os valores variam entre 1, para um refletor perfeito, e 0, para um corpo negro que absorve toda a energia que recebe (Avdelidis e Moropoulou, 2003). Por ser uma das características dos materiais que influencia a medição da radiação infravermelha este tema é abordado, pormenorizadamente, mais à frente.

A radiação emitida por uma superfície (L_{\uparrow}) é governada, também, pelas leis de Plank e de Stefan-Boltzmann e depende da emissividade e da temperatura a que as superfícies se encontram.

Na cidade, a emissividade das superfícies é, tipicamente, superior a 0,90. Assim, a reflexão em grande comprimento de onda é muito fraca e por isso a expressão anterior pode ser simplificada para:

$$L^* = L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad \text{Eq. 8}$$

³ Um corpo negro é aquele que absorve toda a energia que o atinge e emite a máxima radiação para uma dada temperatura.

em que L^* corresponde ao balanço entre a radiação recebida pelas superfícies e a radiação por elas emitida, em grande comprimento de onda.

Segundo Alcoforado *et al.* (2014) a radiação emitida pela atmosfera em grande comprimento de onda e que é recebida pela superfície pode aumentar em áreas urbanas devido à poluição do ar, enquanto, a radiação de grande comprimento de onda perdida para a atmosfera pode ser mais baixa nas áreas urbanas devido ao SVF ser mais baixo.

2.4. Breve apresentação teórica da termografia infravermelha

Tal como muitas outras técnicas das quais usufruímos hoje, a termografia infravermelha tem como base fenómenos descobertos há mais de 200 anos.

Em 1800, William Herschel descobriu os raios infravermelhos, quando tentava determinar a quantidade de calor que passava através dos filtros coloridos com que observa o Sol. Cerca de 40 anos mais tarde, John Herschel produziu a primeira imagem de calor, através de um método chamado evapografia. Foi também responsável pelo 1º registo de uma imagem térmica em papel, designando-a por termograma (Barreira, 2004; Mendonça, Amaral, e Catarino, 2013; Oliveira, 2012).

Durante a 1ª Guerra Mundial começaram a ser desenvolvidos os primeiros sistemas de infravermelhos para fins militares (Oliveira, 2012). Alguns anos mais tarde (1929) Czemy conseguiu melhorar a técnica de criação de imagens térmicas (Holst, 2000). No período da 2ª Guerra Mundial desenvolveu-se o sistema FLIR (*Forward Looking Infra Red*), sistema que era utilizado pelo exército americano na deteção de inimigos (Oliveira, 2012).

As primeiras câmaras térmicas de infravermelhos surgiram já no final da década de 60 do século XX. Na década de 70, o desenvolvimento de aplicações militares desta técnica permitiu construir os primeiros sistemas de imagens térmicas portáteis, que eram utilizados, sobretudo, em diagnósticos de edifícios e em testes não destrutivos de diversos materiais. Os modelos iniciais tinham muito pouca resolução espectral térmica e espacial.

Entre os anos 70 e 90 do século XX, deram-se rápidos avanços nesta tecnologia que permitiram o desenvolvimento de uma série de aplicações para esta técnica. Até aos anos 80, a precariedade de imagens, a falta de *softwares* apropriados para o tratamento dos termogramas e a utilização desta técnica por pessoas não habilitadas desacreditaram, de certa forma, a termografia como método de diagnóstico. A partir dos anos 80 o desenvolvimento de sistemas computacionais mais eficazes levou a uma grande evolução desta técnica.

Nos anos 90 deu-se um grande avanço no que diz respeito ao desenvolvimento destes sistemas, com a introdução de um novo dispositivo o *Focal Plane Array* (FPA). Surge assim uma nova geração de equipamentos com detetores matriciais, que permitem a leitura simultânea de

temperaturas em diferentes pontos, que não necessitam de sistemas de arrefecimento, facilitando, ainda mais, a utilização deste tipo de equipamentos.

A partir do ano 2000, o preço de produção das câmaras térmicas foi descendo drasticamente à medida que a qualidade dos equipamentos aumentava, levando ao crescimento exponencial desta técnica como indústria própria.

Recentemente, têm vindo a ser desenvolvidas câmaras térmicas com um fim cada vez mais comercial, com a redução do peso dos equipamentos, uma maior portabilidade, custos mais baixos e *softwares* mais intuitivos que permitem a utilização desta técnica em variadíssimos setores.

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva, utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objeto, que é invisível ao olho humano, em imagens visuais com um perfil detalhado do comportamento térmico desses objetos (Al-Habaibeh *et al.*, 2010; Sousa, 2010; Silva, 2012).

Todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$) emitem radiação de forma contínua, na região espectral dos infravermelhos (Avdelidis e Moropoulou, 2003; Silva, 2012; Sousa, 2010), com diferentes intensidades e comprimentos de onda, em função da temperatura e das características das superfícies (Barreira, 2004). A termografia infravermelha mede a parte dessa radiação referente aos raios infravermelhos.

A radiação eletromagnética de um objeto varia consoante a sua capacidade de emissão e a temperatura a que este se encontra, sendo o aumento da radiação emitida proporcional à quarta potência da temperatura. Esta radiação depende, portanto, da temperatura dos objetos, assim, quanto mais quente está um objeto maior será a quantidade de radiação infravermelha emitida.

Esta radiação é um tipo de energia idêntica à radiação visível, às ondas de rádio e aos raios-x. Propaga-se em forma de ondas através do espaço como perturbações vibratórias elétricas e magnéticas (Barreira, 2004).

O espectro eletromagnético abrange uma grande gama de comprimentos de onda (fig. 5). A distância entre dois picos consecutivos de onda designa-se por comprimento de onda. O olho humano apenas consegue detetar a radiação dos comprimentos de onda do “visível”. Antes desta gama situam-se as regiões dos ultravioletas, dos raios-x e dos raios gama, que têm comprimentos de onda muito curtos. Depois da radiação visível, situam-se as regiões dos infravermelhos, das micro-ondas e das ondas de rádio, cujos comprimentos de onda são longos.

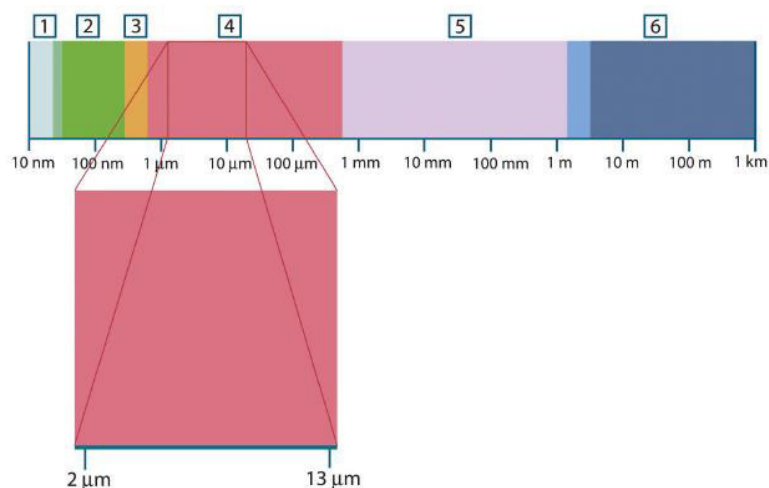


Figura 5 - Espectro eletromagnético

Nota: 1- Raios-x; 2 - Raios UV; 3- Zona dos raios visíveis; 4 - Infravermelho; 5- Micro-ondas; 6 - Ondas-rádio.

Fonte: FLIR (2010)

A radiação infravermelha estende-se entre os 0,75 µm (micrómetros) e os 1000 µm e pode ser dividida, segundo Barreira (2004), em infravermelhos (IV) próximos (0,75 – 1,5 µm), IV médios (1,5 – 20 µm) e IV extremos (20 – 1000 µm). Há alguns autores que dividem a gama desta radiação em quatro, acrescentando à divisão anterior os raios IV longos, cujo comprimento de onda está entre os 6 e os 15 µm. Esta segunda divisão é apresentada na figura 6.

Enquanto as imagens captadas pelo olho humano resultam da radiação direta proveniente do Sol e refletida pelos objetos, com a utilização dos raios infravermelhos é possível inspecionar objetos mesmo sem qualquer tipo de luz, uma vez que todos os objetos, tendo temperaturas acima do zero absoluto, emitem radiação.

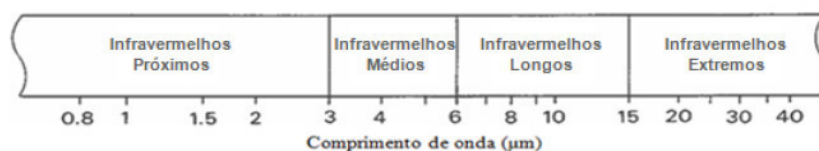


Figura 6 - Espectro eletromagnético parcial

Fonte: Silva (2012)

2.4.1. A medição da radiação infravermelha com instrumentação portátil

Apesar da simplicidade aparente desta técnica, a análise dos resultados pode ser complicada e conduzir a conclusões erradas se não foram tomadas algumas precauções antes e durante a realização do ensaio. Segundo Barreira (2004) é necessário ter em consideração dois aspetos:

- A emissividade dos materiais varia com o comprimento de onda e com o ângulo de observação, ou seja, com o ângulo do qual são recolhidas as imagens;
- A refletividade dos materiais pode causar alguns problemas na medição da radiação infravermelha. Deve ter-se em conta que os materiais refletem uma fração

da energia emitida pelo ambiente mas também emitem radiação própria, por se encontrarem a uma determinada temperatura;

Durante a recolha da termografia existem alguns aspetos que são necessários ter em consideração, uma vez que podem afetar o processo de medição da emissividade dos materiais e modificar substancialmente os resultados que obtemos. Para além dos aspetos referidos anteriormente é necessário ter em atenção as condições meteorológicas sob as quais é realizado o ensaio, sendo preferível dias em que não ocorra precipitação. Sob qualquer outro tipo de tempo é sempre possível a realização de ensaios termográficos no exterior.

Para além das condições meteorológicas deve ter-se em atenção a altura do ano e o período do dia em que são realizadas as medições. A altura do ano influencia o ângulo de incidência da radiação solar. É necessário ter atenção o período do dia em que se realizam as medições devido ao número de horas que as fachadas se encontram a receber radiação solar. A necessidade de se registar estes aspetos é especialmente importante se, se tiver como objetivo comparar “termogramas” recolhidos em diferentes alturas do ano ou do dia.

A distância entre o objeto e a câmara térmica não deve ser demasiado longa nem muito curta. A resolução dos termogramas diminui com o afastamento entre o equipamento e o objeto, logo deve manter-se a menor distância de medição possível em relação ao objeto (Silva, 2012) mas uma distância suficiente para cobrir o máximo de superfície possível. No momento da recolha das imagens térmicas a atmosfera que se encontra entre os objetos e o recetor perturba as medições. Segundo Barreira (2004) a atenuação atmosférica é o aspeto que causa maiores problemas durante a medição. No entanto, a pequena distância este fator pode ser negligenciável.

A realização de ensaios termográficos no exterior está ainda sujeita a outros fatores como a existência de obstáculos (árvores, postes de eletricidade, etc.) que dificultam a recolha dos termogramas e aos quais é necessário prestar especial atenção se estes figurarem nos termogramas recolhidos, sendo necessário descartar os valores registados nestas superfícies.

2.4.2. A interpretação dos termogramas

A interpretação das imagens térmicas é um aspeto fundamental e complexo da aplicação desta técnica que pode ser realizada de forma quantitativa e qualitativa (Barreira, 2004; Sousa, 2010; Silva, 2012; Fox *et al.*, 2014).

A análise qualitativa é rápida, de fácil interpretação e deve ser utilizada quando se pretende uma abordagem mais superficial do problema. Segundo Barreira (2004), são recolhidos termogramas que, apenas pela observação e sem entrar em grandes detalhes de medição, permitem avaliar termicamente o elemento em estudo. Neste tipo de análise os termogramas podem ser recolhidos com emissividade constante e a interpretação pode ser realizada “*in situ*” e,

posteriormente, seguida de um relatório. Não permite, no entanto, quantificações exatas das temperaturas dos edifícios. A mesma autora salienta que embora de aplicação simples é muito importante que quem efetua os ensaios e os interpreta tenha alguma experiência. Fox *et al.* (2014) dizem que este tipo de análise constitui uma avaliação visual dos padrões de cores dos termogramas resultantes dos ensaios termográficos, realçando que os utilizadores deste tipo de equipamentos que realizem análises qualitativas devem ser capazes de interpretar os padrões térmicos das imagens de forma a identificarem, inequivocamente, alguma anomalia importante.

Na análise quantitativa as temperaturas superficiais são calculadas através da imagem térmica e de alguns parâmetros analíticos. A abordagem quantitativa acrescenta ao tipo de análise anterior a possibilidade de quantificar os gradientes térmicos para uma análise numérica (Fox *et al.*, 2014). A temperatura superficial do objeto é registada e são introduzidos parâmetros na câmara térmica como a temperatura ambiente, a humidade relativa, a distância à superfície e a emissividade. Sousa (2010) diz que a termografia quantitativa passa por quantificar as variações de temperatura superficial dos objetos. Este tipo de análise é mais demorado por exigir maior detalhe mas é mais eficaz, uma vez que permite calcular temperaturas de superfície (Barreira, 2004).

2.4.3. Vantagens e limitações da termografia de proximidade

Tal como qualquer outra técnica, a termografia infravermelha apresenta vantagens e desvantagens já referidas na literatura especializada. Por um lado, esta técnica apresenta vantagens por ser não-destrutiva e não-invasiva, o que evita, face a outros testes, a destruição de qualquer área da envolvente dos edifícios. É também uma técnica muito eficaz e que permite estudar e analisar grandes áreas de forma rápida. Alguns autores referem que as imagens resultantes da termografia são de fácil interpretação qualitativa, uma vez que as temperaturas são representadas por diferentes cores. Com esta técnica é possível realizar estudos noturnos sem fontes de iluminação externas, abrindo a possibilidade de estudos durante este período, aspeto fundamental no âmbito da climatologia urbana, por permitir estudar as temperaturas das superfícies na altura em que a intensidade da Ilha Urbana de Calor é teoricamente maior. Uma outra vantagem evidente desta técnica é ser muito mais pormenorizada na recolha da temperatura das superfícies do que os satélites e, ainda, o facto de permitir fazer a recolha em superfícies verticais, como as fachadas.

Por outro lado, as desvantagens associadas com esta técnica estão muitas vezes associadas com a necessidade de grande precisão na recolha dos termogramas, sob pena de não existir a possibilidade de utilização das imagens ou mesmo de comparação de termogramas recolhidos em diferentes alturas. Também, e apesar de ser uma técnica de aplicação pouco dispendiosa, o custo dos equipamentos constitui uma desvantagem, que tem vindo a ser ultrapassada com a produção

de equipamentos cada vez mais baratos e acessíveis por parte de várias empresas (Barreira, 2004; Garcia, 2014; Mendonça, 2005; Silva, 2012; Sousa, 2010).

Embora na bibliografia analisada existam alguns estudos realizados com esta técnica, no âmbito da climatologia urbana, estes são praticamente inexistentes. Num estudo muito recente Chui *et al.* (2018) referem que as câmaras térmicas são muito vantajosas pela sua precisão e capacidade de recolher e processar vastas quantidades de dados, pixel a pixel, em comparação com outras técnicas de medição da temperatura de superfície que o fazem de forma pontual, apenas num local do objeto.

Tendo em consideração as vantagens desta técnica e, apesar das suas desvantagens pretende-se estabelecer um protocolo para a aplicação da termografia em meio urbano, no âmbito da climatologia urbana, onde até à atualidade esta técnica tem sido pouco explorada.

2.4.4. Aplicações da termografia

Apesar de apresentar algumas desvantagens a termografia tem vindo a ser aplicada em diversos setores e a ser aperfeiçoada e desenvolvida nas últimas décadas. Inicialmente utilizada para fins militares (Holst, 2000; Barreira, 2004; Sousa, 2010; Silva, 2012), hoje em dia é aplicada em muitos outros setores. As principais utilizações desta técnica encontram-se resumidas no quadro 2.

Quadro 2 - Principais aplicações da termografia infravermelha

Setor	Aplicações
Científico	Medicina
	Medicina Veterinária
	Astronomia
Industrial	Manutenção de sistemas mecânicos
	Manutenção de sistemas elétricos
	Controlo do processo de fabrico de diversos materiais
Segurança e Vigilância	Fins militares
	Combate a incêndios
	Policimento
	Buscas e salvamentos
	Navegação
Outras aplicações	Arqueologia
	Monitorização ambiental
	Geologia, vegetação e solo
	História e arte
	Meteorologia
	Oceanografia
Engenharia Civil	Deteção de zonas com isolamento deficiente nas fachadas
	Deteção de problemas nas coberturas
	Deteção de fugas de ar através da envolvente opaca ou das janelas
	Deteção de pontos de menor resistência em ensaios de fogo
	Avaliação do conforto de revestimento de pavimento

Adaptado de Barreira (2004)

Desde a ciência às áreas da segurança e vigilância, esta técnica tem vindo a ser utilizada em variadíssimos setores. Na bibliografia consultada, pode constatar-se que a termografia é uma técnica muito usada em setores como a engenharia civil (Barreira, 2004; Sousa, 2010; Silva, 2012 e outros), na ciência, em áreas como a geologia, a arqueologia, a oceanografia e a meteorologia, na medicina (Adam *et al.*, 2017; Su *et al.*, 2017), na medicina veterinária (Daglish *et al.*, 2017) e em várias indústrias, nomeadamente, no controlo do processo de fabrico de materiais.

Dentro da climatologia urbana as potencialidades desta técnica foram ainda pouco exploradas. Destaca-se, no entanto, o trabalho de Doulos *et al.* (2004) que utilizaram esta técnica na avaliação de 93 tipos de materiais habitualmente utilizados nos pavimentos e superfícies urbanas. Estes autores tentaram perceber quais os materiais mais adequados para utilizar nas áreas urbanas de forma a contribuir para a diminuição das temperaturas do ar. De acordo com os resultados os autores conseguiram classificar todos os materiais em “frios” e “quentes”.

Muito recentemente, Chui *et al.* (2018), exploraram a utilidade desta técnica na determinação das temperaturas do ar em meio urbano, em comparação com outras técnicas, utilizando um *proxy* para determinar as temperaturas do ar. Os autores conseguiram demonstrar que os resultados obtidos através da termografia permitem ultrapassar obstáculos que outras técnicas de medição da temperatura acarretam, salientando, no entanto, que as potencialidades desta técnica para este fim precisam ainda de ser melhor exploradas.

Também Lee *et al.* (2018) utilizaram a termografia no âmbito da climatologia urbana. Estes autores tentaram perceber o efeito, à microescala, de elementos urbanos, como árvores, os materiais utilizados nos pavimentos e no revestimento dos edifícios, nas temperaturas de superfície, em três ruas comerciais de Seul (Coreia do Sul). Concluíram que o efeito-sombra proporcionado pelas árvores é importante na diminuição das temperaturas de superfície durante o dia. Outros fatores como o albedo e a emitância⁴ das superfícies também afetam as temperaturas de superfície dos materiais.

Neste trabalho pretende-se mostrar a aplicabilidade da termografia infravermelha em estudos sobre o clima urbano à escala microclimática, mais precisamente, na determinação da temperatura de superfície das fachadas em estudo e do seu balanço radiativo.

⁴ A emitância expressa a quantidade total de energia térmica emitida por unidade de área, numa determinada unidade de tempo, em todos os comprimentos de onda.

Capítulo III - O clima da região de Lisboa e medidas de mitigação da IUC

Neste capítulo pretende fazer-se um breve enquadramento do clima da região de Lisboa e apresentar algumas das medidas de mitigação para um dos fenómenos climáticos que caracteriza o clima urbano. Apresenta-se ainda um breve estado da arte sobre estudos dedicados à Ilha Urbana de Calor (IUC), à escala regional e microclimática e que apresentam medidas para a sua mitigação.

3.1. O clima urbano de Lisboa

Em cada uma das regiões climáticas de Portugal existem inúmeras diferenciações locais que dependem, ou das características do substrato geográfico ou da existência de um aglomerado urbano, onde a ação antrópica modifica as condições ambientais (Alcoforado e Dias, 2001). Em 1984, Oke definiu climatologia urbana como “o estudo dos estados atmosféricos mais frequentes” nas áreas urbanas (Andrade, 2005).

Segundo Alcoforado (2010), Lowry (1977) evidenciou a natureza do clima urbano. Este autor, partindo do princípio de que não existem alterações nos climas regional e local, tentou isolar o efeito da urbanização de onde se entende que: o clima de um local (M) é constituído pelo conjunto dos elementos climáticos; estes efeitos climáticos correspondem à soma do efeito regional (C), de particularidades locais (L) e do efeito urbano (U):

$$M_{itx} = C_{itx} + L_{itx} + U_{itx} \quad \text{Eq. 8}$$

em que i se refere ao tipo de tempo e t ao momento, na estação x , que poderá ser urbana u ou rural r . Anteriormente à urbanização a situação pode ser descrita:

$$M_{i0r} = C_{i0r} + L_{i0r} + 0 \quad \text{Eq. 9}$$

Assumindo que não há alterações climáticas na região em estudo anteriores à urbanização, ou seja, C e L conservem-se constantes, o efeito urbano pode ser descrito como:

$$U_{itu} = M_{itu} - M_{i0r} \quad \text{Eq. 10}$$

Oke (2002) refere que a análise do clima urbano pode ser feita a várias escalas. De acordo com Alcoforado (2010) o clima de uma cidade, nas escalas global e regional, é influenciado por fatores como a latitude, a continentalidade, o relevo e a posição relativamente à circulação atmosférica predominante. Por outro lado, as características da própria cidade, como a sua rugosidade, influenciam os padrões de vento, a temperatura, a precipitação e o escoamento superficial.

Segundo Lopes (2003), o clima urbano é composto pelo conjunto dos microclimas, cada um influenciado pelas características do seu espaço adjacente. Alcoforado (2010, p. 13) define clima urbano como uma “modificação espacialmente bem delimitada do clima regional, cuja importância tem aumentado devido ao grande incremento da população urbana em todo o Planeta”.

A escala de análise do clima urbano é um elemento-chave no estudo do mesmo. No entanto, Andrade (2005) refere que as categorias espaciais, sejam elas quais forem, são sempre arbitrárias, uma vez que os fenómenos atmosféricos têm uma natureza contínua, aos quais não se deve impor limites estáticos.

Em 1987, Oke sugeriu alguns limiares para a distinção das várias escalas climáticas urbanas (fig. 7). Estes limites foram retificados posteriormente. Segundo Oke (2006), quando se olha para a cidade na horizontal existem três escalas de interesse, em que a primeira, a mesoescala (a), tem uma abrangência espacial até algumas dezenas de quilómetros. O autor refere que a cidade tem influência no estado do tempo à escala da cidade inteira, englobando todos os fenómenos que ocorrem na escala das aglomerações urbanas.

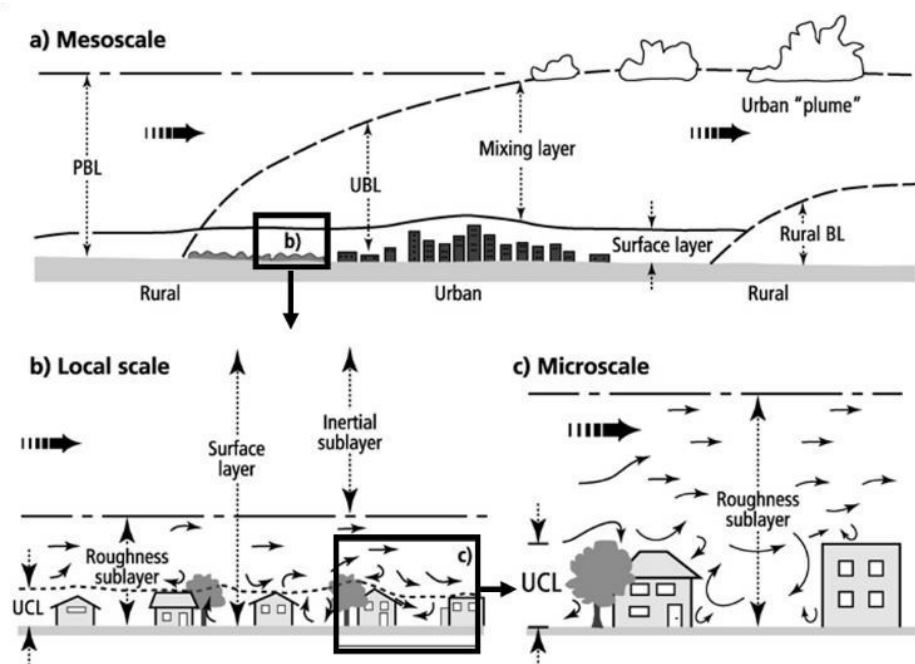


Figura 7 – Divisões na escala horizontal de análise dos fenómenos climáticos em áreas urbanas
Extraído de Oke (2006)

Já a escala local (b) tem uma abrangência entre os 100 metros e alguns quilómetros. Inclui as características da cidade, como a topografia, mas não tem em conta os fenómenos microclimáticos. Nas áreas urbanas esta escala inclui, por exemplo, bairros cuja morfologia urbana é homogênea. Segundo Alcoforado (2010) um clima local integra o mosaico de microclimas que se repetem com alguma regularidade.

Na microescala (c) os fenómenos climáticos ocorrem numa distância inferior a centenas de metros. Todos os objetos e superfícies têm um microclima envolvente (Oke, 2006), uma vez que afetam diretamente o comportamento da atmosfera que os envolve. Os estudos microclimáticos estão relacionados com as dimensões de edifícios individuais, árvores, ruas, praças ou jardins (Alcoforado, 2010).

Para se entender a divisão vertical da atmosfera urbana Oke (2006) explica que esta difere da atmosfera rural porque as trocas de calor e de humidade não ocorrem imediatamente junto à superfície mas sim numa camada superior. A atmosfera urbana divide-se em duas grandes camadas: a *Urban Canopy Layer* (UCL) e a *Urban Boundary Layer* (UBL). A segunda camada divide-se em duas subcamadas: *Surface Layer* ou Camada Turbulenta Superficial e a *Mixed Layer* ou Camada de Mistura.

A UCL ou Atmosfera Urbana Inferior é a camada entre o solo e o topo da superfície ativa urbana que corresponde ao limite superior dos principais obstáculos urbanos. Já a UBL ou Atmosfera Urbana Superior é, de acordo com Oke (2006) a camada acima da UCL cujas características sofrem modificações devido à presença de aglomerações urbanas. Esta camada divide-se em *Surface Layer* e *Mixed Layer*.

Por um lado, a *Surface Layer* ou Camada Turbulenta Superficial é caracterizada por uma intensa turbulência de pequena escala e subdivide-se em *Roughness Layer* ou Camada de atrito e *Constant Flux Layer* ou Camada de Fluxo Constante. Na Camada de Atrito o fluxo é muito irregular e é controlado pela superfície do solo (Oke, 1987, citado por Alcoforado, 2010). Em áreas de forte densidade de construção, a altura desta camada é muito menor em comparação com a altura que apresenta em áreas de baixa densidade de construção. A Camada de Fluxo Constante, é a camada onde a variação da turbulência com a altitude é inferior em 10% à sua magnitude (Alcoforado, 2010), sendo o perfil de vento mais estável em comparação com a camada inferior.

Por outro, a *Mixed Layer* ou Camada de Mistura, é a camada onde a convecção livre domina, não sendo afetada por nenhuma característica proveniente dos níveis abaixo (Alcoforado, 2010).

O clima das áreas urbanas resulta de modificações nas superfícies e das atividades antrópicas nas cidades. As principais modificações nas áreas urbanas são ao nível do uso do solo, traduzindo-se na redução das áreas verdes e no aumento de áreas edificadas. A remoção da vegetação pode alterar profundamente as propriedades das superfícies e contribuir para modificar o balanço radiativo dessas áreas (Oke, 2002) através da alteração do albedo e de outras componentes deste balanço. Deste modo, a evapotranspiração é menor assim como o sombreamento nas áreas urbanas.

Monteiro (1993) refere alguns fatores que contribuem para a alteração do balanço energético da cidade: a complexa geometria das áreas urbanas, a forma e orientação dos edifícios, as propriedades térmicas dos materiais utilizados, a impermeabilização do solo e o calor libertado pelas diversas atividades antrópicas.

Ganho (1999) refere que o clima urbano resulta da substituição da cobertura natural do solo por materiais “urbanos”, como a pedra, o cimento e o asfalto. Para além disso, também a geometria urbana e as alterações que a composição da baixa atmosfera sofre modificam o clima urbano.

Nas grandes aglomerações urbanas, aos fatores locais do clima pelo qual são influenciados (domínio climático em que se inserem), adicionam-se os que resultam da urbanização (Alcoforado e Dias, 2001). É a estes que devemos prestar maior atenção percebendo de que forma influenciam o clima urbano.

Segundo Oke (2002) as consequências das modificações nas áreas urbanas são muito variadas e levam a fortes mudanças nos sistemas naturais das cidades. É, portanto, necessário estudar as relações entre as diferentes componentes do sistema urbano e perceber como a alteração de uma afeta as restantes. De acordo com o mesmo autor, só assim é possível entender os efeitos climáticos provocados pela urbanização e evitar modificações indesejáveis e negligentes no futuro.

Um maior número de edifícios na paisagem da cidade leva a alterações radiativas, térmicas, termohigrométricas e aerodinâmicas e da envolvente dessas estruturas (Oke, 2002). As modificações mais evidentes no balanço radiativo destas áreas são o decréscimo na radiação solar direta que é recebida nas áreas que ficam na sombra destas grandes estruturas, um incremento das reflexões múltiplas entre os edifícios e ainda modificações nos padrões de vento dentro das cidades, alterados pela nova geometria imposta nestas áreas (Lopes, 2003).

Andrade (2005), citando Landsberg (1981), Oke (1987; 1988), Kuttler (1988) e Arnfield (2003), refere que o clima urbano resulta de modificações que as superfícies, os materiais e as atividades humanas provocam nos balanços de energia, massa e movimento da cidade.

Segundo Alcoforado *et al.* (2009) o espaço urbano provoca várias modificações climáticas, sendo as mais importantes o aumento da temperatura, a redução da velocidade do vento e a possibilidade de ocorrência de circulações de fluxos indesejáveis e perigosas, e em certos casos, aumento da precipitação. Para além destas consequências, as cidades modificam ainda a composição da atmosfera urbana, com grandes emissões de poluentes, devido ao tráfego automóvel e às atividades industriais.

Também a geometria das áreas urbanas está associada à formação de ilhas de calor (Nakata-Osaki, de Souza, e Rodrigues, 2016). A introdução de novos materiais de construção, alteração de volumetrias, as emissões de calor, humidade e poluentes são os fatores mais importantes envolvidos na alteração do clima urbano (Lopes, 2003).

Neste trabalho dá-se especial atenção ao clima urbano de Lisboa. A escala tratada é a da UCL. Importa compreender que o desenvolvimento sustentado desta área deverá passar pelo conhecimento dos fenómenos que resultam da interação entre as superfícies da cidade e a atmosfera urbana percebendo, não apenas o clima regional mas os microclimas existentes em toda a região.

3.1.1. As ilhas de calor e as ilhas de frescura urbanas

A cidade de Lisboa tem um clima do tipo mediterrâneo, com verões quentes e secos, caracterizado pela concentração da maior parte da precipitação entre outubro e abril, atingindo os valores máximos entre novembro e fevereiro. Em termos de temperatura do ar, os valores médios anuais rondam os 16°C, sendo os valores mínimos atingidos entre dezembro e fevereiro e os mais elevados entre os meses de julho e setembro (Alcoforado, 1992; Lopes, 2003).

As características do clima da região de Lisboa dependem, essencialmente, de fatores geográficos regionais, como a latitude e a proximidade ao oceano Atlântico, onde este último confere à cidade uma amenidade térmica característica e um regime de ventos marcado por uma elevada frequência de ventos de norte e NW (Alcoforado *et al.*, 2005). Segundo Alcoforado (1993), na escala mesoclimática e local, o clima de Lisboa é condicionado pela topografia acidentada da cidade e pela posição à beira-Tejo.

O primeiro estudo sobre o clima da região de Lisboa foi realizado por Maria João Alcoforado (1988, 1992), onde a autora analisa a IUC de Lisboa e compara o regime térmico de dois bairros desta região. Posteriormente, a mesma autora publicou vários artigos referidos por Ganho (1999).

Alguns anos mais tarde, Andrade (1994) e Lopes (1994) publicaram duas teses onde o clima urbano está implícito. O primeiro dedicou-se ao estudo da poluição atmosférica e do clima da região de Lisboa enquanto o segundo estudou os padrões térmicos, à escala local, na região de Oeiras (Ganho, 1999).

Mais tarde, foram desenvolvidos diversos estudos sobre o clima da região que vieram contribuir para o conhecimento das modificações que a urbanização provoca no clima (Andrade, 2003; Lopes, 2003). Desde aí foram vários os trabalhos que se dedicaram a este tema, tanto sobre o clima desta região, como sobre a IUC, estudando-a e compreendendo a sua formação, estrutura e padrões de evolução (Alcoforado e Andrade, 2006; Alcoforado *et al.*, 2014).

Tal como foi referido anteriormente, o clima urbano resulta das modificações que as características das cidades provocam nas condições climáticas “gerais” de uma cidade. Como referem Lopes (2006) e Viveiros (2017), as cidades caracterizam-se por um mosaico urbano muito bem arranjado de áreas mais aquecidas e áreas mais frescas. Por um lado, existem locais onde, ao contrário do que acontece nas áreas mais quentes, a temperatura se encontra mais baixa do que a que é registada na envolvente. Ao efeito que se sente nestas áreas dá-se o nome de “Ilha de Frescura” ou “Ilha de Calor Negativa”, termo inicialmente introduzido em Portugal na Climatologia Urbana por Alcoforado (2010). Estas áreas são, normalmente, associadas aos espaços verdes, parques ou jardins mas também às áreas que ficam à sombra das grandes infraestruturas urbanas.

Por outro lado, existem locais onde as temperaturas são bastante mais elevadas. Ao fenómeno que ocorre quando os centros urbanos se encontram mais quentes do que as áreas rurais envolventes dá-se o nome de Ilha Urbana de Calor (Lopes, 2003; Oke, 2002). Estes são, normalmente, locais densamente edificados onde as características urbanas promovem o aquecimento urbano.

Este fenómeno é a principal modificação climática causada pelo Homem em meio urbano e é uma consequência direta das modificações dos balanços energético e radiativo do espaço urbano (Alcoforado *et al.* 2009). Este é um dos padrões térmicos mais evidentes do clima das cidades, ocorre praticamente em todo o mundo (Lopes, 2003) e é um dos fenómenos mais estudados sobre o clima urbano (Alcoforado *et al.*, 2005).

A IUC pode constituir uma potencialidade se, se pensar por exemplo, que a temperatura da cidade, por não diminuir tanto como nas áreas rurais evita o consumo excessivo de energia no inverno. Contudo, no período quente, pode constituir uma limitação em locais cujo consumo energético, na utilização de sistemas climatizadores, tenha custos elevados e não permita uma sustentabilidade energética dessas cidades.

A magnitude ou intensidade da IUC pode ser quantificada pela diferença entre a temperatura registada no local mais quente da cidade, num dado momento, e a temperatura mais baixa de todos os locais com características rurais que envolvem a cidade (Alcoforado, 1993; Oke, 2002; Lopes, 2003). Segundo Alcoforado *et al.* (2009) a intensidade deste fenómeno varia de cidade para cidade e depende da densidade de construção, da abundância de vegetação, da emissão de calor pelas atividades humanas e das características dos materiais de construção e revestimento. Assim, um H/W mais elevado pode ser associado a intensidades de ilha urbana de calor mais elevadas (fig. 8).

A densidade de construção de uma cidade afeta a magnitude destes fenómenos na medida em que, quanto mais densa a construção e maior a altura dos edifícios, mais intensa será a ilha de

calor (Alcoforado *et al.*, 2009). Pelo contrário, uma maior quantidade de vegetação contribui para a redução da IUC e do aquecimento urbano.

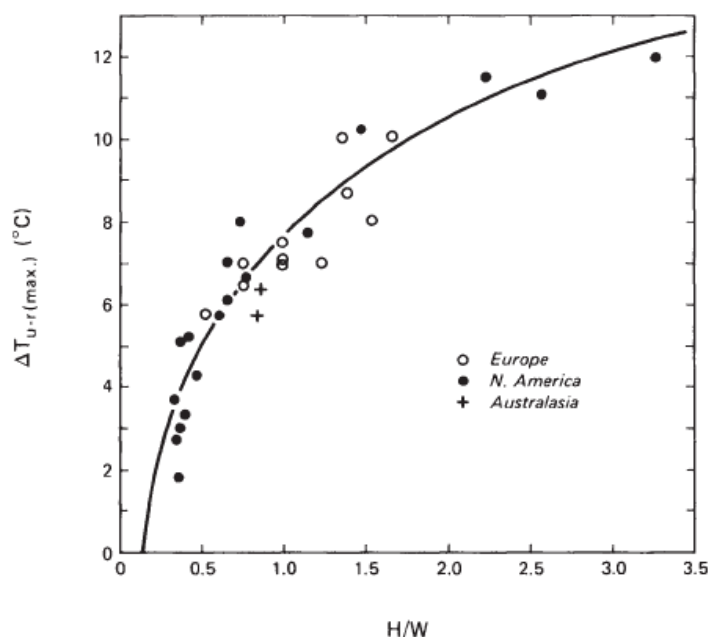


Figura 8 – Relação entre a intensidade máxima da Ilha Urbana de Calor e a relação H/W nos canyons urbanos
Fonte: Oke (2002)

A grande emissão de calor e poluentes pelas atividades humanas e industriais aquece e contamina a atmosfera urbana. Este é também um fator que contribui para que a intensidade da ilha urbana de calor seja maior.

O tipo de materiais de construção e de revestimento utilizados nas cidades determina a quantidade de energia que é absorvida e emitida para a atmosfera, potenciando este fenómeno. O crescente uso de diferentes tipos de materiais nas cidades, com grande capacidade de aquecimento e baixo albedo, quando associado à redução da vegetação potencia o efeito da IUC (Mohajerani, Bakaric, e Jeffrey-Bailey, 2017).

Por este motivo, o presente trabalho pretende ser um contributo para a tomada de decisões e implementação de medidas de mitigação para a IUC adequadas ao contexto urbano de Lisboa.

Nas últimas décadas foram muitos os trabalhos que se debruçaram sobre este tema, dando-lhe especial atenção numa altura em que as alterações climáticas e a sustentabilidade energética são temas muito debatidos. No ponto seguinte referem-se os tipos de estudos que têm vindo a ser desenvolvidos, a diferentes escalas, em Portugal e no mundo.

Os tipos de Ilha Urbana de Calor

O 1º estudo sobre o conceito de Ilha Urbana de Calor (IUC) foi de Luke Howard (1818). Na obra intitulada de “*The Climate of London, deduced from Meteorological Observations*”, o

autor conseguiu, através de duas séries de temperaturas mensais obtidas naquela cidade e nas áreas periféricas, entre 1807 e 1816, registar diferenças de temperatura, na ordem dos 0,5°C a 2,2°C. O estudo de Howard constituiu o ponto de partida para a discussão sobre este tema e sobre as possíveis causas deste fenómeno (Joaquim, 2011).

A IUC é um fenómeno climático potenciado pelas características das cidades e também pode ser estudado a diferentes formas. Apesar da definição “geral” aceite de que este fenómeno corresponde à diferença de temperatura entre os centros urbanos e as áreas periféricas é possível distinguir diferentes tipos, com base no nível a que estas se formam, por apresentarem génese, magnitude e dinâmica temporal diferentes (Oke, 2002):

- Ilha de calor da *Urban Canopy Layer* (ou da Atmosfera Urbana Inferior);
- Ilha de calor da *Urban Boundary Layer* (ou da Atmosfera Urbana Superior);
- Ilha de calor de superfície;

Os diferentes tipos de IUC podem ser estudados e avaliados de diferentes formas, tal como mostra a figura 9.

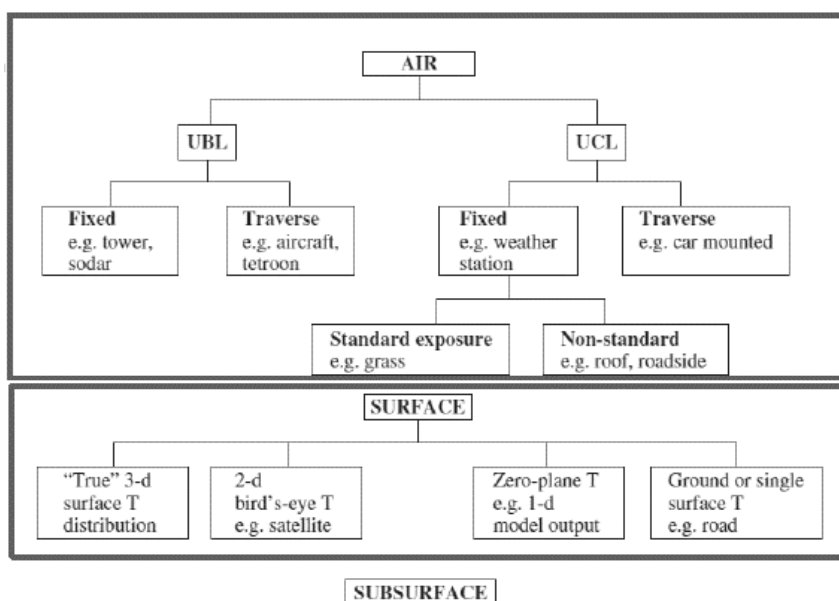


Figura 9 – Classificação dos tipos de ilha urbana de calor mais comuns e exemplos de como estas podem ser estudadas

Fonte: Bridgman e Oliver (2006), adaptado de Oke (1995)

Segundo Chui *et al.* (2018) é muito importante distinguir temperaturas de superfície e temperaturas do ar. As primeiras são determinadas através de radiações de grande comprimento de onda emitidas por qualquer superfície, enquanto as segundas se referem a volumes de ar junto ao solo. Segundo os mesmos autores, que citam Dear e Brager (1998), a temperatura do ar tem maior relevância para o estudo do conforto térmico humano e para a compreensão das

necessidades energéticas para o arrefecimento dos edifícios, em especial na estação quente. Referem ainda que embora as duas possam ser correlacionadas não devem ser confundidas.

Para o estudo da ilha de calor superficial, analisam-se, normalmente, as temperaturas de superfície (*Land Surface Temperatures*). Estas temperaturas são obtidas a partir dos valores de radiação detetados pelos sensores térmicos que estão a bordo de aeronaves (Lopes, 2003) e também através das bandas térmicas de vários satélites (Peres, Lucena, Rotunno Filho, & França, 2018).

Segundo Matson *et al.* (1978), o primeiro estudo sobre a ilha de calor superficial foi realizado por Rao, em 1972. Com recurso a um *scanner* radiométrico colocado a bordo do TIROS *Operational Satellite* (ITOS-1), o autor tentou demonstrar que o corredor Nova-Iorque-Filadélfia-Baltimore-Washington (DC) apresentava as temperaturas mais elevadas.

Em 1977, Carlson *et al.* realizaram uma análise da temperatura de superfície diurna e noturna na área de Los Angeles, utilizando dados térmicos no infravermelho, retirados do satélite NOAA 3 *Very High Resolution Radiometer* (VHRR), com 1 km de resolução. O estudo destes autores mostrou que as temperaturas matinais mais elevadas se encontram nas zonas industriais. Pelo contrário, no período noturno as temperaturas mais elevadas foram registadas sobre as áreas urbanas densamente edificadas (Matson *et al.*, 1978).

No mesmo ano, Scofield e Weiss (1977), utilizaram sequências de 30 minutos de imagens visíveis, com 1km de resolução, e imagens térmicas com 8km de resolução retiradas do *Synchronous Meteorological Satellite* (SMS). Estes autores tentaram demonstrar que as nuvens *Cumulus* se formam tipicamente sobre áreas como Washington (DC) e Baltimore, devido à emergência do ar por causa do aquecimento diferencial entre áreas urbanas e áreas rurais (Matson *et al.*, 1978).

Em 1978, Matson *et al.* detetaram a IUC de superfície noturna no oeste e noroeste dos Estados Unidos, a partir de dados de satélite do NOAA 5 (Matson *et al.*, 1978; Rasul, Balzter, e Smith, 2015).

Em Lisboa, Alcoforado (1986) efetuou os primeiros estudos com recurso a uma imagem térmica obtida a partir de um sensor *Deadalus* instalado numa plataforma aerotransportada que realizou voos em Lisboa, durante o inverno de 1984 (Lopes, 2006). Mais tarde Lopes e Vieira (2001) e Lopes (2003), através de imagens de satélite Landsat (TM) e NOAA 14, respetivamente, vieram contribuir para o conhecimento deste padrão térmico e dos fluxos radiativos e energéticos de calor turbulento e condutivo que estão na origem da IUC.

Até à data foram realizados inúmeros estudos sobre a ilha de calor da Atmosfera Urbana Inferior. Alcoforado (2010) refere dois casos clássicos da literatura estrangeira: Chandler (1962),

que estudou a ilha de calor em Londres e Oke (1987) que realizou o mesmo estudo em Vancouver. Este tipo de estudos pode ser encontrado também na literatura nacional, veja-se, por exemplo, estudos em Lisboa, como Alcoforado (1992) e Andrade (2003) e noutras cidades como Évora (Alcoforado e Taborda, 1996), Porto (Monteiro, 1997), Coimbra (Ganho, 1998) e Aveiro (Pinho e Orgaz, 2000).

Segundo Lopes (2006), no estudo deste tipo de ilha de calor, as temperaturas são, normalmente, medidas em percursos itinerantes, em estações meteorológicas urbanas ou, mais recentemente, obtidas através de registadores colocados em pequenos abrigos colocados em locais estratégicos em meio urbano.

Santamouris (2007) refere que ilha de calor da Atmosfera Urbana Inferior tem vindo a ser estudado há pelo menos 100 anos. No seu trabalho menciona os principais estudos desenvolvidos sobre este tema na Europa, nos últimos 15 anos, apresentando os principais estudos realizados no sul da Europa, na Europa Central e Reino Unido e na Europa do Norte. O mesmo autor refere os três principais tipos de estudos que podem ser feitos:

- Com base em cálculos estatísticos das diferenças de temperatura entre estações colocadas nas cidades e nas áreas periféricas;
- Estudos baseados nos resultados obtidos através de redes de medição fixa na área urbana;
- Através de medições itinerantes dentro das áreas urbanas.

A ilha de calor da Atmosfera Urbana Superior é o tipo menos estudado. Contudo, é possível encontrar estudos dedicados ao seu conhecimento. Normalmente, com o lançamento de balões cativos é possível conhecer a estrutura desta ilha de calor em altitude. Salienta-se aqui o estudo de Lopes e Vieira (2002). Segundo os autores o lançamento de balões cativos com aparelhos registadores leves e de baixo custo é uma forma eficiente de conhecer a estrutura térmica urbana. Neste trabalho os autores apresentam uma metodologia aplicada à escala microclimática no bairro de Telheiras, em Lisboa. Os autores conseguiram demonstrar a utilidade desta técnica em estudos microclimáticos, concluindo que o ritmo térmico no interior da área de estudo é nitidamente dependente do balanço radiativo e percebendo o comportamento interno da estrutura das diferentes camadas da atmosfera.

3.2. Medidas para a mitigação da IUC

As ilhas de calor urbano são um problema global que ameaça a habitabilidade, o ambiente e a sustentabilidade das cidades. Este fenómeno está a tornar-se mais intenso nas áreas urbanas, alterando os seus microclimas (Synnefa, Santamouris e Livada, 2006).

O conceito de IUC está já bem investigado e documentado como se viu anteriormente. Porém, o conhecimento que se tem deste tópico é sempre limitado aos estudos realizados em algumas cidades por todo o mundo, não sendo possível generalizar resultados, uma vez que cada cidade apresenta características específicas.

O efeito da IUC intensificou-se nos últimos anos devido às alterações que as cidades foram sofrendo, com a redução da vegetação, utilização de superfícies escuras e materiais com baixo albedo e uma maior produção de calor antropogénico (Stone *et al.*, 2010, citados por Mohajerani *et al.*, 2017). É, portanto, compreensível que as condições de superfície de uma área urbana afetem diretamente a escolha das medidas de mitigação deste fenómeno nas várias cidades do mundo. Tal como refere Grimmond (2007) perceber as causas da IUC permite desenvolver estratégias de mitigação deste fenómeno adaptadas para cada cidade.

Sendo um fenómeno de grande importância e um assunto global de interesse a todas as cidades afetadas, são já inúmeros os estudos que sugerem medidas de mitigação para este fenómeno. Existem, essencialmente, dois conjuntos de medidas: por um lado, as que pretendem aumentar o albedo nas cidades e, por outro, as que pretendem incrementar a evapotranspiração, através do aumento de áreas ocupadas com vegetação.

O primeiro tipo de medidas pode ser atingido alterando os materiais utilizados nas áreas urbanas, uma vez que os materiais com emissividade baixa são os principais responsáveis pelo incremento de temperaturas de superfície durante a noite (Nouri, 2015; Synnefa *et al.*, 2006). O segundo consiste na implementação de mais áreas verdes dentro das cidades.

Segundo Prado e Ferreira (2005) a redução da temperatura de superfície dos materiais e a plantação de árvores em meio urbano contribui diretamente e de forma eficaz para a redução dos efeitos negativos das IUC. Os mesmos autores afirmam que a utilização de “telhados frios”⁵, em conjunto com o aumento do número de espaços verdes, constitui uma medida de baixo custo que pode ser implementada em áreas urbanas já existentes ou que venham a ser construídas.

Synnefa *et al.* (2006) referem que a utilização de materiais refletivos ou com albedo mais elevado é uma medida pouco dispendiosa que permite melhorar as temperaturas do ar, bem como mitigar a IUC.

Como refere Leandro (2011), os espaços verdes podem minimizar os impactes decorrentes do crescimento urbano, através, por exemplo, da redução dos consumos energéticos dos edifícios. Susca, Gaffin e Dell’Osso (2011) afirmam que em áreas urbanas densamente edificadas é difícil

⁵ Entenda-se por telhados frios aqueles que são construídos (ou remodelados) de forma a refletirem maior quantidade de energia do que os telhados convencionais, normalmente revestidos com cores mais claras.

construir grandes áreas verdes e, por isso, a substituição dos “típicos” telhados, por telhados verdes⁶ ou telhados frios, pode constituir uma medida alternativa e pouco dispendiosa para a de mitigação da IUC.

Santamouris (2014) diz que os telhados providenciam um espaço excelente para a aplicação destas duas técnicas de mitigação: por um lado os telhados refletivos (ou frios) são tipicamente mais claros e têm um elevado albedo, aumentando a reflexão e contribuindo para uma diminuição das temperaturas de superfície; por outro, os telhados verdes têm diversas vantagens, enumeradas pelo autor, como maior durabilidade dos materiais (que se encontram protegidos pela vegetação), redução do consumo de energia para arrefecimento (no período de verão), uma vez que há um menor aquecimento do interior dos edifícios, melhoria da qualidade do ar e diminuição do ruído e contribuem para a mitigação da Ilha Urbana de Calor.

Para além dos materiais e do tipo de superfícies urbanas que as cidades têm, também as formas urbanas desempenham um papel fundamental na formação da IUC. De acordo com Vieira e Vasconcelos (2003) a morfologia urbana desempenha um papel fundamental na variação das temperaturas do ar e das superfícies. Afirmam ainda que a estrutura urbana de uma cidade pode ser considerada a principal causa para a formação de uma ilha urbana de calor. A geometria urbana é, segundo os mesmos autores, determinante na formação das ilhas de calor porque regula a absorção e a emissão de calor, modificando a temperatura do ar junto ao solo, assim como as temperaturas de superfície.

Wang *et al.* (2016) referem que as formas urbanas densas são, normalmente, responsáveis por múltiplas reflexões da radiação solar, influenciam a convecção do ar para fora dos *canyons* urbanos e as perdas de calor devido a um SVF baixo. Edifícios elevados e ruas estreitas reduzem o SVF, aumentando a quantidade de área que fica à sombra na superfície, mantendo o fundo do *canyon* urbano mais fresco durante o dia mas mais aquecido à noite.

Em 2005, Alcoforado *et al.* propuseram algumas medidas de mitigação para a IUC e para o aquecimento urbano da cidade de Lisboa. Os autores mencionam a necessidade de se manter um SVF elevado, criar mais espaços verdes dentro da área urbana e selecionar materiais de construção adequados. Para além destas três grandes orientações, e com vista, não só a mitigação deste fenómeno, mas também para combater o progressivo aquecimento urbano que se tem vindo a sentir, apontam a necessidade de se manter os principais corredores de ventilação e implementar telhados “frios” ou verdes na cidade.

As medidas apresentadas por estes autores são para a mesoescala. Quando se transpõem para a microescala é necessário adaptá-las a uma realidade específica. Veja-se, por exemplo, a

⁶ Os telhados verdes são normalmente aplicados em superfícies planas, com a construção de um solo artificial que serve de suporte a variadas espécies vegetais (Leandro, 2011).

manutenção dos corredores de ventilação: à mesoescala a implementação desta medida é de extrema importância, contudo, promovê-la à microescala pode ser prejudicial e aumentar o desconforto térmico dos transeuntes, com o eventual incremento da velocidade da passagem de fluxos numa escala mais pequena.

Alcoforado *et al.* (2010) realizaram um estudo à microescala onde salientam três fatores que permitem limitar o aquecimento urbano, garantir condições de ventilação e aumentar o conforto estival, são eles: a geometria urbana, os espaços verdes e os materiais de construção e de revestimento utilizados dentro da cidade. As orientações dadas pelos autores foram resumidas no quadro 3.

Quadro 3 - Orientações climáticas para a Lisboa à escala microclimática

Fatores	Orientações climáticas para a escala microclimática	
Materiais de construção	Seleção de materiais	Deve ser feita em função do albedo, da condutividade térmica e da capacidade calorífica.
		Esta seleção deve ser feita de forma criteriosa para permitir reduzir a transferência e armazenamento de calor mas de forma a que não se proporcionem efeitos nocivos.

Adaptado de Alcoforado *et al.* (2010)

Quanto ao tipo de materiais a utilizar em meio urbano, objeto de estudo na presente dissertação, a sua escolha deve ser feita em função de três características: albedo, condutividade térmica e capacidade calorífica. Esta seleção deve ser feita de forma criteriosa, garantindo a redução das transferências e do armazenamento de calor. Porém, deve ter-se em conta os possíveis efeitos nocivos que a escolha de materiais pode trazer, como fenómenos de encadeamento dos transeuntes ou o aumento do *input* radiativo sobre o corpo humano, aumentando o desconforto térmico.

Independentemente das medidas de mitigação propostas, seja à escala regional, local ou microclimática, importa perceber que, até agora, se estudou este fenómeno olhando para a cidade como um plano, sem entrar em detalhe na tridimensionalidade das áreas urbanas.

Neste trabalho não se pretende estudar a IUC da cidade de Lisboa, mas sim, uma das causas que contribui para a sua formação: o *input* que o aquecimento dos materiais dá ao aquecimento do ar. Mais do que perceber que tipo de materiais são utilizados nas áreas urbanas, pretende-se conhecer os mecanismos de aquecimento/arrefecimento da Camada Limite Atmosférica Urbana Inferior.

Capítulo IV – Metodologia

Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada na presente dissertação e apresentam-se os dados recolhidos e os instrumentos e *softwares* utilizados.

4.1. Introdução

Tal como foi referido no capítulo I, o objetivo deste trabalho é calcular o balanço radiativo de um conjunto de fachadas de edifícios em Telheiras. A figura 10 pretende esquematizar as diferentes metodologias utilizadas.

Primeiramente, como forma de enquadramento da área de pormenor foram calculadas as temperaturas de superfície, através de imagens *Landsat* 8, seguindo a metodologia de Ndossi e Avdan (2016). Para a monitorização da temperatura e humidade relativa do ar no *canyon* urbano selecionado foi instalada uma rede microclimática na área de estudo. Neste capítulo apresenta-se como se procedeu à instalação dos instrumentos, como foi feita a aquisição dos dados e o seu tratamento. Foram recolhidas as temperaturas das fachadas e das superfícies da área de estudo através da termografia infravermelha. O balanço radiativo das fachadas foi calculado *in situ* com recurso a um radiómetro. Os resultados obtidos no modelo 3D foram comparados com a temperatura do ar, a temperatura das fachadas e as componentes do balanço radiativo recolhidos no *canyon* urbano.

Para a realização desta dissertação foram recolhidos diversos dados:

- Imagens de satélite térmicas *Landsat* 8, através do *LandViewer*⁷;
- Temperatura do ar a 2 metros de altura, com recurso a registadores automáticos do tipo Hobo Pro V2;
- Temperatura das fachadas e superfícies da área de estudo, com recurso a uma câmara térmica (modelo FLIR B425);
- Temperatura e humidade relativa do ar, no momento da recolha das imagens térmicas, utilizando um termohigrómetro, do tipo *HoboWare Pro V2*;
- As quatro componentes do balanço radiativo das fachadas e superfícies, através de um radiómetro, composto por um piranómetro e um pirgeómetro.

Foram ainda utilizados diversos *softwares* cuja finalidade é apresentada no quadro 4.

Nas secções seguintes são apresentadas de forma detalhada as metodologias que permitiram a realização deste trabalho.

⁷ <https://eos.com/landviewer/>

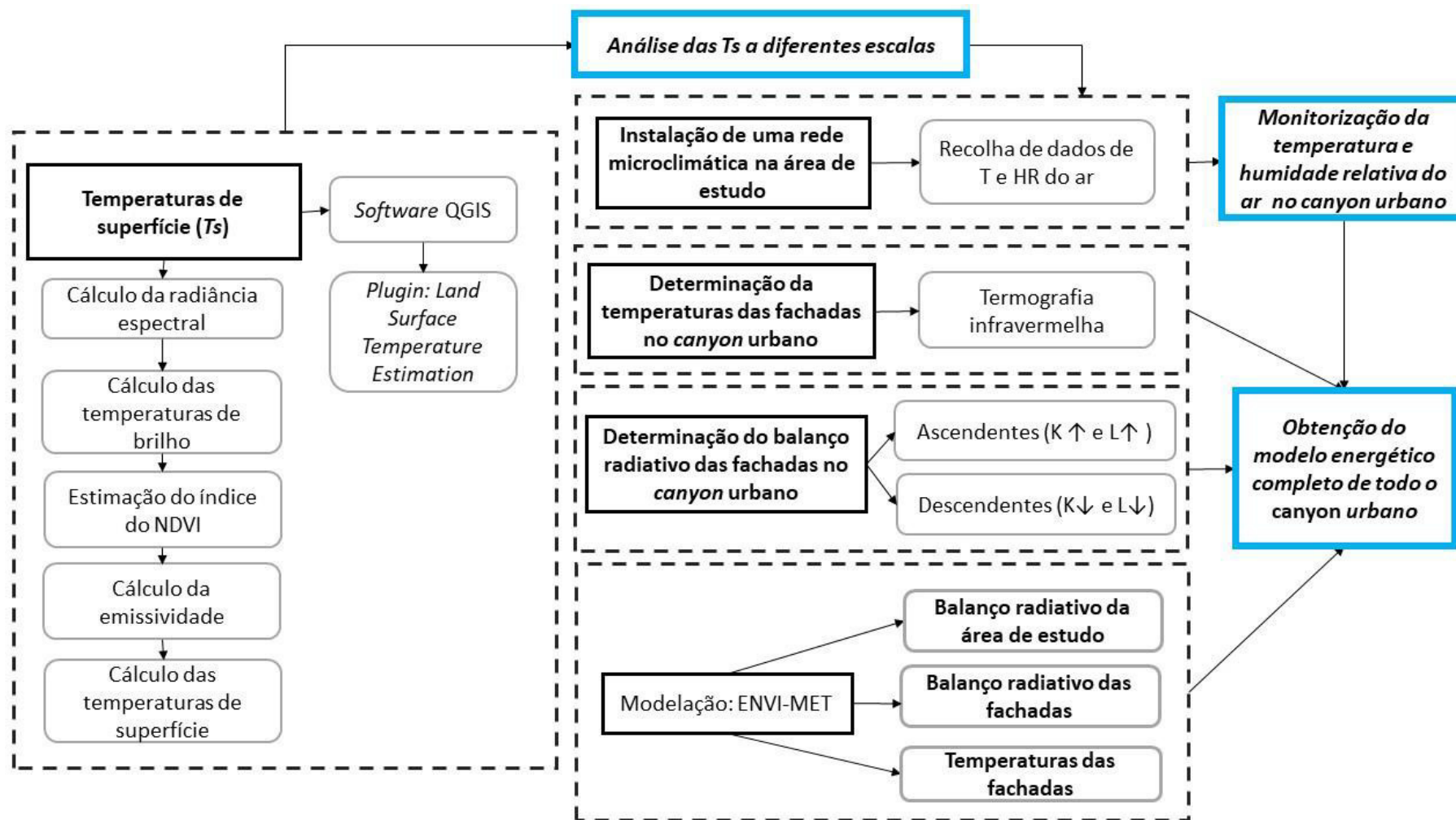


Figura 10 – Esquema-síntese das metodologias

Quadro 4 - Softwares utilizados e respetiva finalidade

<i>Software</i>	<i>Finalidade</i>
<i>Quantum-GIS</i>	Cálculo das temperaturas de superfície através de imagens de satélite <i>Landsat 8</i>
<i>FlirTools</i>	Tratamento das imagens térmicas
<i>HoboWare Pro</i>	Recolha dos dados de temperatura e humidade relativa, recolhidos a 2 metros do solo, através de uma rede microclimática instalada na área de estudo
<i>ENVI-met</i>	Modelação microclimática de diferentes variáveis micro meteorológicas na área de estudo

4.2. Cálculo das temperaturas de superfície: análise de mesoescala

Através de imagens de satélite *Landsat 8* e com recurso ao *software Quantum GIS (QGIS)* calcularam-se as temperaturas de superfície (T_s) para as quatro estações do ano. A metodologia utilizada foi desenvolvida por Ndossi e Avdan (2016). Os autores desenvolveram um plugin que permite calcular as temperaturas de superfície tendo como base imagens de satélite: o *Land Surface Temperature Estimation*. Nesta dissertação foram utilizadas imagens *Landsat 8*.

4.2.1. Breve descrição das características do satélite *Landsat 8*

Desde 1972, os satélites *Landsat* estão a recolher imagens da superfície da Terra. O programa *Landsat* é um projeto conjunto da *United States Geological Survey (USGS)* e da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, sendo esta última organização responsável pela construção dos instrumentos de deteção remota, pelo seu lançamento e pela validação do funcionamento. A USGS é responsável pela aquisição, arquivo e disponibilização das imagens, bem como pelo fornecimento de qualquer produto produzido pela instituição. Nos anos 60, as duas instituições juntaram esforços para desenvolver o primeiro satélite civil de observações da superfície terrestre. Este objetivo foi cumprido a 23 de julho de 1972 com o lançamento do *Landsat 1*, originalmente designado “*Earth Resources Technology Satellite*”. Apresentam-se no quadro 5 as datas das missões realizadas desde então. Está previsto para 2020, o lançamento do *Landsat 9* (USGS, 2012).

O satélite *Landsat 8* orbita a Terra a cerca de 705 quilómetros de altitude e termina uma órbita a cada 99 minutos, completando 14 órbitas num dia, passando em cada local de 16 em 16 dias. Segundo a USGS (2012), as órbitas dos *Landsat 7* e 8 estão desencontradas para permitir uma cobertura de 8 em 8 dias de todos os pontos da Terra. Contudo, as imagens do *Landsat 7* apresentam problemas desde 31 de maio de 2003, altura em que o mecanismo que permitia fazer a recolha das imagens em sequência falhou. Desde então todas as imagens apresentam uma perda de 22% dos dados. Assim, e embora existam métodos para o preenchimento destas falhas, a utilização destas imagens não foi equacionada.

A bordo do *Landsat 8* existem dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Ambos fornecem um sinal melhorado e uma quantificação de 12-bits dos dados radiométricos (USGS, 2012; 2015). O OLI recolhe dados em nove bandas de pequeno comprimento de onda: 8 bandas espectrais com 30 metros de resolução e uma banda pancromática com 15 metros de resolução. O TIRS recolhe dados em duas bandas de grande comprimento de onda, com 100 metros de resolução.

Quadro 5 - Datas das missões Landsat

Satélite	Data de lançamento	Fim da missão
<i>Landsat 1</i>	23 de julho, 1972	6 de janeiro, 1978
<i>Landsat 2</i>	22 de janeiro, 1975	27 de julho, 1983
<i>Landsat 3</i>	5 de março, 1978	7 de setembro, 1983
<i>Landsat 4</i>	16 de julho, 1984	15 de junho, 2001
<i>Landsat 5</i>	1 de março, 1984	2013
<i>Landsat 6</i>	5 de outubro, 1993	Não foi bem-sucedido
<i>Landsat 7</i>	15 de abril, 1999	Em funcionamento
<i>Landsat 8</i>	11 de fevereiro, 2013	Em funcionamento

Fonte: USGS (2012)

4.2.2. Aquisição das imagens térmicas

Para o cálculo das temperaturas de superfície foram utilizadas quatro imagens de satélite, uma para cada estação do ano (quadro 6).

Quadro 6 - Datas das imagens de satélite recolhidas para o cálculo das temperaturas de superfície (*Land Surface Temperature – LST*)

Período	Data	Hora da passagem
Primavera	12 de abril de 2017	11h14m
Verão	17 de julho de 2017	
Outono	5 de outubro de 2017	
Inverno	6 de março de 2015	

As imagens para a primavera, o verão e o outono são referentes ao ano de 2017. Para o período de inverno, uma vez que todas as imagens de 2016 tinham problemas na banda térmica e as de 2017 apresentavam nebulosidade sobre a área de estudo, foi utilizada uma imagem referente ao ano de 2015. Todas as imagens foram recolhidas no *LandViewer*. Esta plataforma digital permite aos utilizadores retirar até 10 conjuntos de bandas por dia.

4.2.3. Metodologia para a obtenção das LST

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de Ndossi e Avdan (2016) utilizada para o cálculo das temperaturas de superfície no QGIS, com base no *plugin Land Surface Temperature Estimation*. Para uma melhor compreensão elaborou-se um esquema síntese desta metodologia (fig. 11).

Em primeiro lugar é necessário converter os Números Digitais (ND) em valores de radiância espectral. Os ND são utilizados de forma a representarem os valores de cada pixel da

imagem mas ainda não se encontram calibrados em unidades mensuráveis (Ndossi e Avdan, 2016).

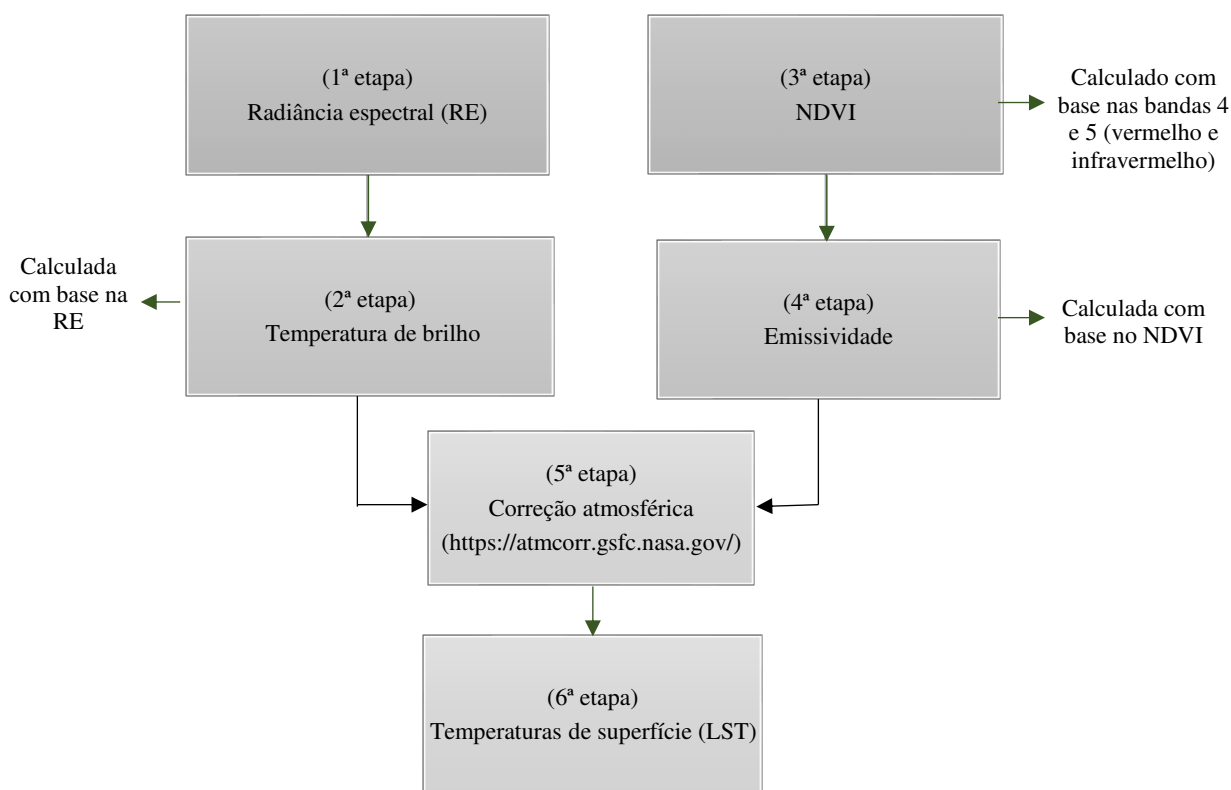


Figura 11 - Metodologia de Ndossi e Avdan (2016) para o cálculo das Ts

Após a conversão dos ND é necessário calcular a temperatura de brilho do topo da atmosfera (2ª etapa). A temperatura de brilho consiste na temperatura necessária para que um corpo negro consiga emitir a mesma quantidade de radiação, por unidade de área, que a superfície observada emite. Quando a radiação de um corpo negro é igual à de outro, a temperatura física deste corpo é conhecida como a temperatura de brilho (Ndossi e Avdan, 2016). No entanto esta temperatura não é real, uma vez que assume que todas as superfícies se comportam como corpos negros face à radiação solar incidente.

Posteriormente ao cálculo da temperatura de brilho é necessário estimar a emissividade das superfícies através do espaço. Segundo Ndossi e Avdan (2016), para este cálculo é necessário fazer-se uma correção de acordo com a emissividade das superfícies. Assim, através do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é possível estimar a emissividade das superfícies.

A emissividade é o rácio que compara a capacidade radiativa de uma superfície com a de um corpo negro. Contudo, na realidade não existem superfícies com as exatas características dos corpos negros. Dentro do *plugin* desenvolvido pelos autores existem dois algoritmos através dos

quais é possível calcular a emissividade das superfícies: com base numa imagem do NDVI (anteriormente calculado) ou através de um algoritmo que estima a emissividade com base em classes de NDVI. Nesta dissertação foi utilizado um índice baseado no trabalho de Zhang *et al.*, referidos por Ndossi e Avdan (2016). De acordo com os autores do algoritmo, quando o NDVI de qualquer área é conhecido a emissividade das superfícies pode ser estimada. Assim, o valor de cada pixel é classificado de acordo com os seguintes critérios: se o NDVI for superior a -0,185 a emissividade das superfícies é classificada como 0,995, se for superior a este valor mas inferior a 0,157 a emissividade deve ser classificada como 0,985, quando o NDVI está entre 0,157 e 0,727 a emissividade é classificada através da expressão $1.009 + 0.047 \cdot \ln(\text{NDVI})$. Quando o NDVI é superior a 0,727 a emissividade é igual a 0,99.

Por último, é necessário calcular as temperaturas de superfície. Tal como mostra o esquema da figura 11, estas são calculadas com base na temperatura de brilho e na emissividade das superfícies. Nesta dissertação foi utilizada a *Radiative Transfer Equation* (Equação de Transferência Radiativa - ETR). Segundo Ndossi e Avdan (2016) esta equação utiliza um intervalo no infravermelho térmico para extrair as temperaturas de superfície.

Uma vez que no momento da passagem dos satélites para a maioria dos locais do planeta não existem dados meteorológicos disponíveis, recorre-se ao software de cálculo online da NASA⁸ para fazer a correção atmosférica necessária antes de se determinarem as temperaturas de superfície. Para isso é indispensável estimar três componentes: a radiância descendente, a radiância ascendente e a transmitância atmosférica (Barsi *et al.*, 2003; 2005).

Barsi *et al.* (2003; 2005) explicam os procedimentos para a realização desta correção atmosférica. Para o cálculo das três componentes é necessário saber o ano, o mês e o dia em que se deu a passagem do satélite, assim como a hora e os minutos. De seguida, é necessário inserir a longitude e a latitude da área para a qual se estão a estimar as temperaturas de superfície. Dado que as imagens têm inúmeros pontos com coordenadas geográficas optou-se por inserir a coordenada geográfica relativa ao canto superior direito das imagens de satélite, informação que pode ser obtida no ficheiro dos metadados.

Para além dos dados temporais e espaciais da passagem do satélite é ainda necessário tomar duas opções: primeiro, é preciso escolher se a correção atmosférica é calculada para um perfil atmosférico para as coordenadas geográficas exatas que são inseridas ou se esse perfil é extrapolado através de um perfil atmosférico padrão (fig.12). Posteriormente, deve indicar-se, se

⁸ <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>

a imagem de satélite é correspondente ao período de inverno ou de verão. É necessário ainda indicar qual o satélite que está a ser utilizado.

Enter the parameters for which you wish calculate atmospheric transmission and upwelling radiance:

Year: Month: Day:
 GMT Hour: Minute:
 Latitude: Longitude:
+ is North, - is South + is East, - is West
☒ Use atmospheric profile for closest integer lat/long [help](#)
☐ Use interpolated atmospheric profile for given lat/long [help](#)
☐ Use mid-latitude summer standard atmosphere for upper atmospheric profile [help](#)
☒ Use mid-latitude winter standard atmosphere for upper atmospheric profile [help](#)
☒ Use Landsat-8 TIRS Band 10 spectral response curve [help](#)
☐ Use Landsat-7 Band 6 spectral response curve [help](#)
☐ Use Landsat-5 Band 6 spectral response curve [help](#)
☐ Output only atmospheric profile, do not calculate effective radiances
Optional: Surface Conditions
(If you do not enter surface conditions, model predicted surface conditions will be used.)
If you do enter surface conditions, all four conditions must be entered.)
 Altitude (km): Pressure (mb):
 Temperature (C): Relative Humidity (%):
 Results will be sent to the following address:
 Email:

Atmospheric Correction Parameter Calculator

Date (yyyy-mm-dd): 2017-04-12
 Input lat/long: 39.950/ -10.250
 GMT Time: 11:14
 L8 TIRS Band 10 Spectral Response Curve
 Mid-latitude winter standard atmosphere
 User input surface conditions
 Surface altitude (km): -999.000
 Surface pressure (mb): -999.000
 Surface temperature (C): -999.000
 Surface relative humidity (%): -999.000
 Band average atmospheric transmission: 0.86
 Effective bandpass upwelling radiance: 1.08 W/m²/sr/μm
 Effective bandpass downwelling radiance: 1.88 W/m²/sr/μm

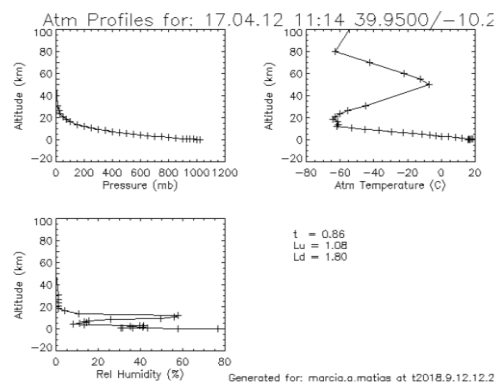


Figura 12 - Interface para a utilização do Atmospheric Correction Parameter Calculator e exemplo de output
 Fonte: <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>

Tal como mostram os resultados obtidos, o cálculo das temperaturas de superfície através de imagens de satélite, não se revelou suficiente para a compreensão do comportamento da temperatura neste *canyon* urbano devido a diferentes limitações que serão discutidas mais à frente mas, sobretudo, por não terem a resolução espacial desejada. Tendo isto em conta optou-se por instalar na área de estudo uma rede microclimática para a monitorização da temperatura do ar (à microescala) e, também, por obter a temperatura das fachadas (3ª dimensão) através da termografia e valores para o cálculo do balanço radiativo das diferentes superfícies urbanas. Todos os procedimentos utilizados apresentam-se de seguida.

4.3. Monitorização da temperatura do ar em meio urbano

Para a monitorização das temperaturas no *canyon* urbano em estudo foi instalada uma rede microclimática na Rua Professor Simões Raposo. Na figura 13 são apresentados os locais selecionados para a instalação dos aparelhos.

A temperatura do ar na área de estudo foi monitorizada através de registadores do tipo *Hobo Pro V2* (fig. 14). Dentro das caixas-abrigo (fig. 14a) encontra-se o *onset Hobo* (fig. 14b), onde são registados os dados recolhidos pelo sensor que se encontra no interior do abrigo meteorológico (fig. 14a). Posteriormente à recolha dos dados na área de estudo, todos foram descarregados através do *Shuttle* (fig. 14c) para o software *HOBOWare Pro* (versão 3.7.13), através do qual foi possível analisar os dados recolhidos.

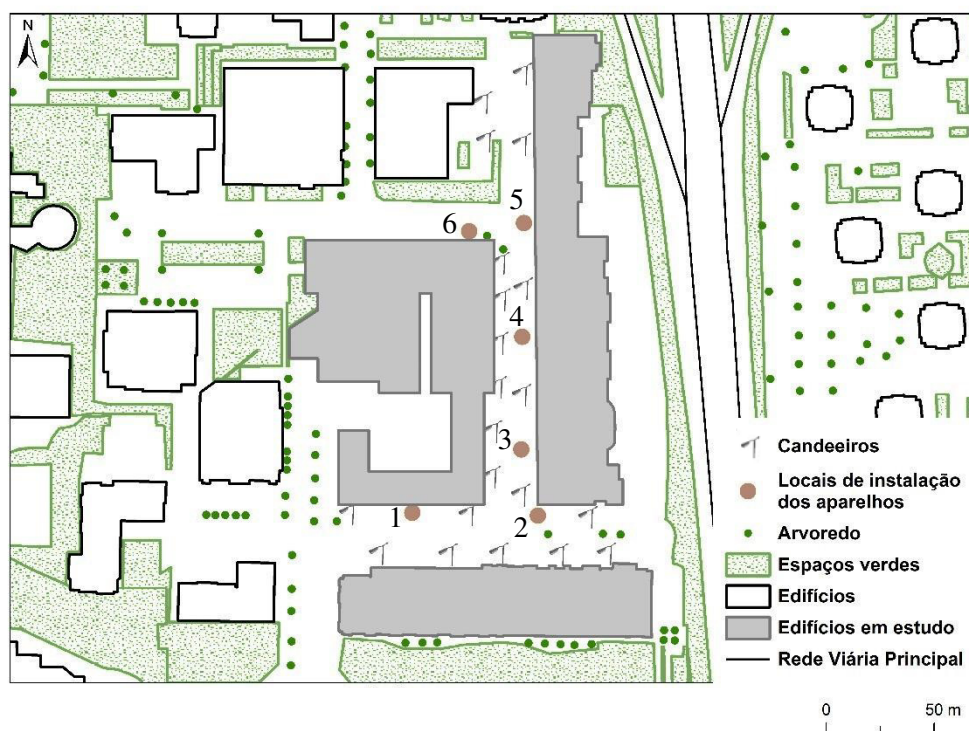


Figura 13 - Esquema da rede microclimática instalada na área de estudo

A instalação dos aparelhos na área de estudo foi realizada com a ajuda do Departamento de Iluminação Pública da Câmara Municipal de Lisboa, no dia 20/04/2018. Todos os instrumentos foram colocados nos postes de iluminação assinalados na figura 13, com auxílio de abraçadeiras de plástico para suporte (fig. 15), a cerca de 3 metros do solo e orientados a norte.

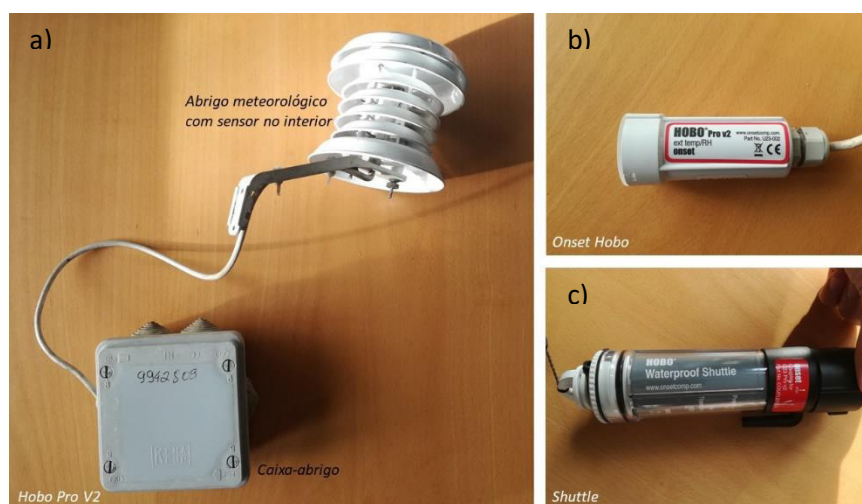


Figura 14 - Registrador automático da temperatura do tipo Hobo Pro V2

Posteriormente à instalação dos aparelhos, as temperaturas do ar foram recolhidas entre os dias 20/04/2018 e 27/07/2018. No dia 28 foi feito o levantamento dos aparelhos que se encontravam na área de estudo.



Figura 15 - Instrumento instalado na área de estudo

Uma vez que o período em que os instrumentos se encontraram a recolher dados foi excecionalmente chuvoso e com bastantes dias com nebulosidade considerável, apenas foram considerados os dias em que a cobertura nebulosa foi inferior a 4/8 oitavos. Os dados de nebulosidade foram recolhidos no *Iowa Environmental Mesonet*. Para colmatar as falhas existentes nos dados foram utilizadas imagens de satélite MODIS. Através destas imagens, se às 12h se observasse mais de 4/8 oitavos de nuvens o dia seria excluído. Para a análise destes dados foram calculadas médias horárias em cada dia, de forma a perceber o comportamento destas duas variáveis na área de estudo.

Os dados registados foram comparados com os valores obtidos através do modelo micrometeorológico *ENVI-met* (descrito mais adiante) de modo a realizar a calibração e validação do modelo.

4.4. Registo das temperaturas de superfície das fachadas

Com a câmara infravermelha térmica (fig. 16) foram recolhidas as temperaturas das fachadas e dos diferentes materiais utilizados nas superfícies da área de estudo. Para a recolha da temperatura de todas as superfícies foi utilizada uma câmara térmica FLIR B425 (fig. 16) com um FOV de 25° x 19° e uma precisão na recolha das temperaturas de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. A câmara térmica utilizada permite recolher temperaturas entre os -20°C e os 120°C . A resolução das imagens térmicas é de 320 x 240 pixéis e o foco pode ser ajustado de forma automática ou manual. O tipo

de FPA (*Focal Plane Array*) é um microbolómetro não arrefecido, que permite detetar a radiação infravermelha no comprimento de onda entre 8-13 μm .



Figura 16 - Câmara térmica FLIR - Modelo B425

Antes da recolha dos termogramas foi necessário parametrizar a câmara térmica de modo a que a temperatura das superfícies seja calibrada, através da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), da humidade relativa (%), da emissividade e da distância ao objeto. Tanto a temperatura como a humidade relativa foram recolhidas com recurso a um termohigrómetro a cerca de 2 metros do solo.

O quadro 7 resume os valores destes parâmetros em todos os dias que se realizou o trabalho de campo. As imagens térmicas foram recolhidas em 2018 em períodos distintos: no inverno, a 21 de fevereiro, na primavera, a 18 de junho e no verão, a 7 de julho. No período de verão foram recolhidas imagens em quatro diferentes horas do dia: 09:00h, 13:00h, 15:00h e 19:00h h. Relativamente ao período da tarde optou-se por recolher imagens em dois períodos diferentes de forma a caracterizar o comportamento das temperaturas na altura de maior aquecimento da atmosfera e com fraca radiação solar incidente no *canyon* urbano.

Quadro 7 – Parâmetros recolhidos durante as idas ao campo

Data da recolha de termogramas	Hora da recolha dos termogramas	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	Humidade Relativa (%)	Distância às fachadas (m)
21/02/18	9h – 10h15	16,4	44	25/17
18/06/2018	15h – 16h	39.6	19	25/17
07/07/18	Entre as 9h e as 19h	22 – 31,4	68 - 38	25/17

Uma vez que as superfícies urbanas não apresentam todas a mesma emissividade, optou-se por recolher as imagens com um valor constante: 0,98.

Dadas as características das ruas estudadas, para a recolha das imagens térmicas das fachadas com exposição a este e a oeste a distância entre a câmara e as fachadas foi de cerca de 25 metros. No caso das fachadas norte e a sul a distância foi de cerca de 17 metros. Para garantir a estabilidade da câmara térmica foi usado um tripé (fig. 17)



Figura 17 - Tripé utilizado para a recolha de termogramas

Nos termogramas não foi incluído o piso térreo, uma vez que este é ocupado apenas por lojas de comércio com portas envidraçadas mas também porque à frente das mesmas se encontram sempre carros estacionados (fontes de calor que podem influenciar as medições obtidas). Para a recolha das imagens térmicas foi seguido o esquema apresentado na figura 18. Para além das fachadas foram recolhidos termogramas das diferentes superfícies existentes na área de estudo: asfalto, pavimento em azulejo e calçada portuguesa.

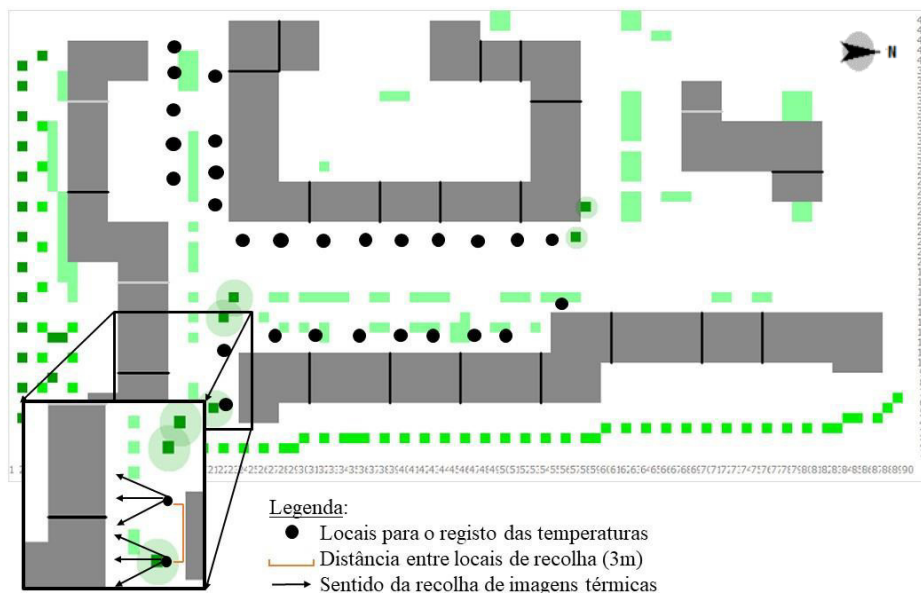


Figura 18 – Esquema do registo das temperaturas de superfície nas fachadas

4.4.1. Tratamento e análise das imagens térmicas

Todos os termogramas recolhidos foram tratados e analisados com recurso ao *software FLIR Tools*⁹. No registo das temperaturas de superfície optou-se por não considerar os valores das janelas, uma vez que sendo superfícies translúcidas apresentam valores de emissividade bastante diferentes dos materiais utilizados nas fachadas dos edifícios. Para além disso, a temperatura destas superfícies é, de certo modo, mais influenciada pelo interior dos apartamentos. A decisão de considerar estas superfícies dependeu também do facto de existirem diferentes tipos de condições onde existiam janelas com estores interiores e exteriores. Por fim, também não foram considerados os valores obtidos em objetos “estranhos” que pudessem estar enquadrados nas imagens térmicas: candeeiros, plantas existentes nas varandas de cada apartamento e, também, as pessoas que por vezes se encontravam nestas.

Para ser possível comparar diferentes termogramas mas também para perceber em que cores e tipos de superfície se registam as temperaturas mais elevadas e mais baixas foram usadas duas escalas: uma para as imagens térmicas das fachadas e uma para as superfícies horizontais.

4.5. Cálculo do balanço radiativo das fachadas e superfícies da área de estudo

Para a estimação das componentes do balanço radiativo das fachadas foi utilizado um radiómetro (Kipp e Zonen), composto por um piranómetro e um pirgeómetro (fig. 19). Estes instrumentos permitiram recolher as 4 componentes do balanço radiativo durante o trabalho de campo: o piranómetro registou as componentes de pequeno comprimento de onda (PCO) e o pirgeómetro as componentes de grande comprimento de onda (GCO).



Figura 19 – Radiómetro composto por um piranómetro e um pirgeómetro

⁹ Descarregado de <http://www.flir.eu/instruments/display/?id=54865>

Para definir as horas a realizar o registo foi utilizado o programa *Rayman*. Em primeiro lugar, através do diagrama solar, determinou-se que na área de estudo a incidência de radiação solar começa pouco antes das 9h e termina perto das 20h (fig. 20). Através deste *software* foi também possível determinar a sombra dos edifícios ao longo do dia, entre as 9h e as 20h (fig. 21).

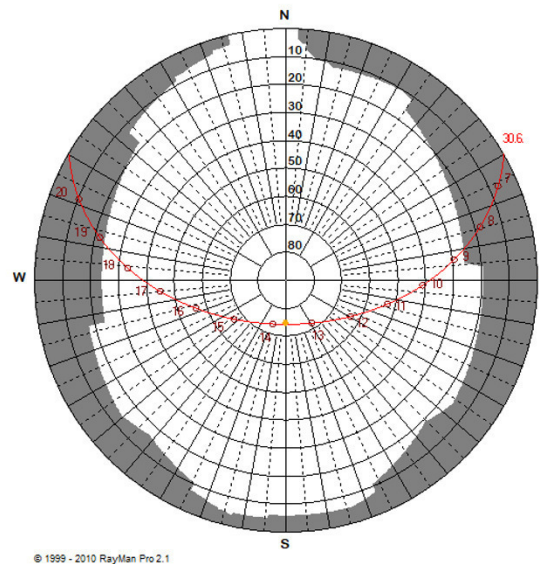


Figura 20 - Diagrama solar da área de estudo para determinação da hora de máxima elevação do sol
Nota: diagrama solar realizado no centro da área de estudo

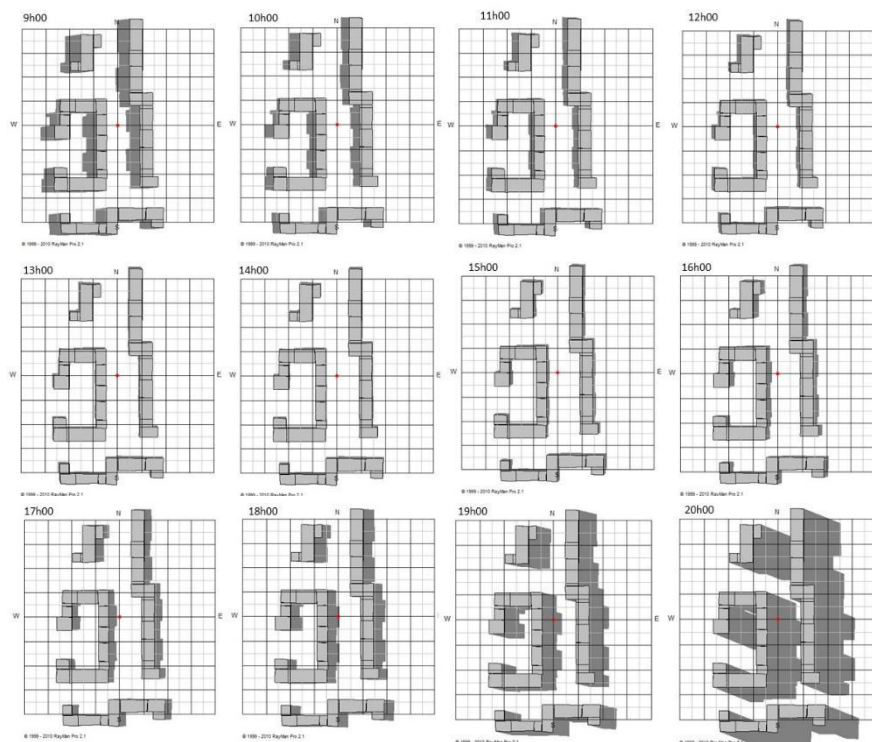


Figura 21 - Variação da área ocupada por sombra na área de estudo ao longo do dia

Para além do número de horas que cada fachada recebe radiação solar direta verificou-se ainda a variação do ângulo de incidência do sol na área de estudo ao longo do dia nesta altura do

ano (quadro 8). Tendo determinado a hora de máxima elevação do sol (13h40) e a sua variação ao longo do dia foi possível definir quais as horas a que devia ser feita a recolha dos valores para o balanço radiativo em cada uma das fachadas, nos diferentes tipos de materiais e em locais estratégicos para avaliar o balanço radiativo da área de estudo.

Quadro 8 - Variação da altura do sol ao longo do dia

UTC +1	Altura do sol (°)
09:00	29.5
10:00	41.1
10:30	47
11:00	52.7
12:00	63.7
13:00	72.3
13:30	74.3
13:40	74.4
13:50	74.3
14:00	73.9
15:00	66.9
16:00	56.5
17:00	45
18:00	33.3
19:00	21.7
20:00	10.6

Assim, a medição dos valores na fachada este foi feita às 10h30 da manhã, em que o ângulo de elevação do sol é de 47°, e na fachada oeste foi feita às 17h, em que o ângulo de incidência do sol é de 45°. Estas foram as horas escolhidas por serem duas horas em que as fachadas se encontravam a receber radiação solar, com um ângulo de incidência idêntico, de forma a que a resposta térmica dos materiais fosse semelhante, embora em períodos diferentes do dia, uma vez que em nenhuma altura do dia as duas fachadas se encontram a receber radiação solar ao mesmo tempo. Para as fachadas norte e sul os valores foram recolhidos na altura em que o sol apresentava a sua elevação máxima. Os locais onde foram recolhidos os valores em cada uma das fachadas encontra-se assinalados na figura 22 a laranja.

Além destas medições, para registar a variação do balanço radiativo nas fachadas ao longo do dia, foram recolhidos valores de hora em hora, nas fachadas do edifício 1 e do edifício 2 (locais assinalados a verde na figura 22). Foi ainda escolhido um local, no centro da área de estudo, onde foram registados também os valores de hora em hora (terceiro ponto verde).

Ainda no centro da área de estudo foi feita a recolha dos valores na altura em que o sol apresentava a sua elevação máxima, de forma a caracterizar o balanço radiativo da área de estudo na hora em que a radiação solar incidente é mais elevada (pontos a azul assinalados na figura 22). Estas medições foram sempre feitas com o radiómetro colocado na horizontal sobre o pavimento em asfalto.

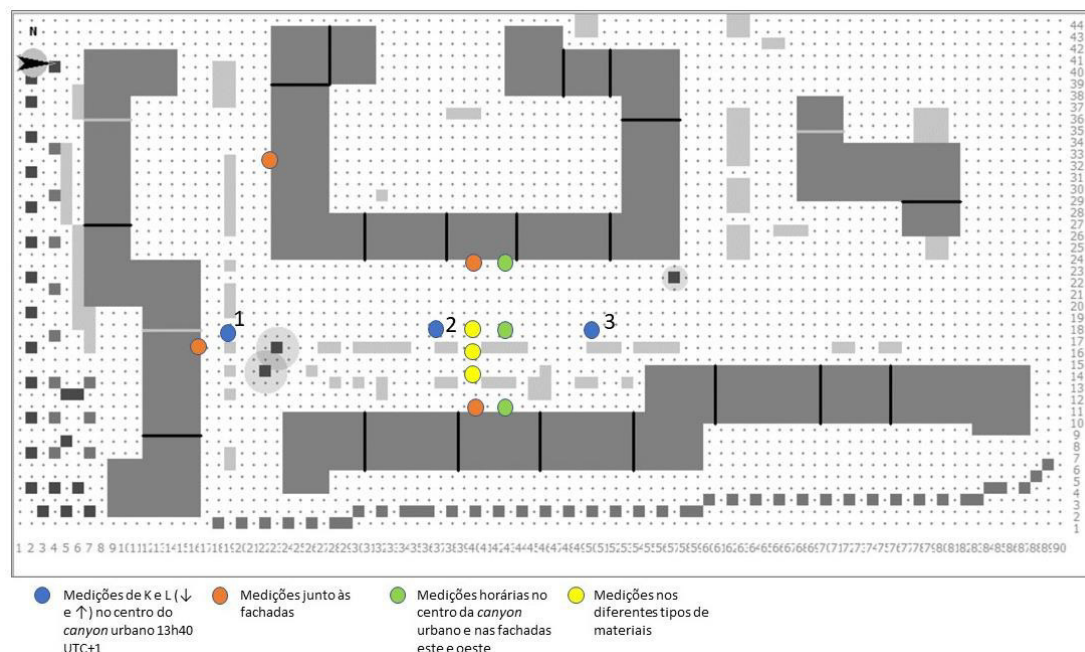


Figura 22 - Localização dos pontos onde foram registadas as componentes do balanço radiativo

Na mesma figura, encontram-se assinalados a amarelo os locais onde foram recolhidos os valores para o cálculo do balanço radiativo dos diferentes materiais utilizados nas superfícies da área de estudo. Foram escolhidos três, cada um com um tipo de material diferente: asfalto, calçada e pavimento.

4.5.1 Calibração do radiómetro

Antes da realização do trabalho de campo procedeu-se à calibração do radiómetro portátil utilizado para a recolha dos valores das componentes do balanço radiativo. Para isso, em três dias do mês de junho e um do mês de julho de 2018, foram registados os valores junto da estação climatológica do IGOT e comparados com os valores do radiómetro.

Uma vez que a correlação feita entre os dados recolhidos com o piranómetro e a estação meteorológica (fig. 23) apresentava um R^2 de 0,93, todos os valores recolhidos em campo foram ajustados de acordo com a seguinte equação:

$$y = 0,8923 + 37,938 \quad \text{Eq. 11}$$

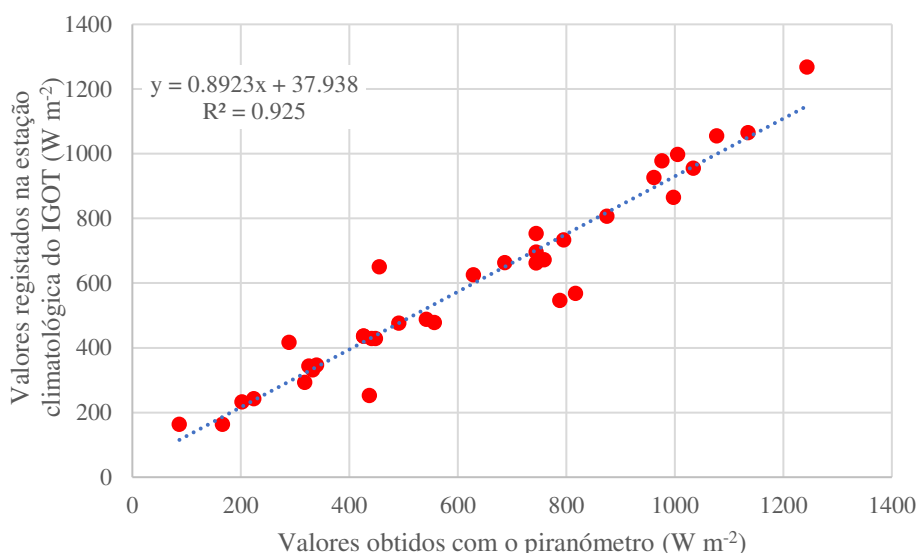


Figura 23 - Correlação entre os dados recolhidos com o piranómetro e os valores registados pela estação meteorológica do IGOT (25, 27, 28 de junho e 5 de julho de 2018)

Relativamente aos valores recolhidos com o pirgeómetro o ajuste necessário foi um pouco maior. A figura 24 mostra a correlação feita entre os dados recolhidos durante a calibração e os valores de reflexão estimados com o auxílio de um termómetro infravermelho térmico.

Para esta calibração foi utilizado um termómetro térmico de forma a saber a temperatura da superfície e foram recolhidos os valores dessa mesma superfície com o radiómetro. Tendo a temperatura de superfície estimou-se a reflexão através da equação 12:

$$L_{\uparrow} = \varepsilon * \sigma * T_s^4 \quad \text{Eq. 12}$$

em que ε representa a emissividade, σ a constante de *Stefan-Boltzmann* e T_s a temperatura de superfície, que neste caso foi obtida com termómetro infravermelho.

Posteriormente correlacionou-se os valores obtidos com o pirgeómetro e os valores estimados através da temperatura de superfície. Uma vez que a correlação apresentava um R^2 de 0,73 procedeu-se ao ajustamento de todos os valores recolhidos em campo de acordo com a equação 13:

$$y = 1,144x - 79.017 \quad \text{Eq. 13}$$

Durante o trabalho de campo fez-se a observação sobre as condições de céu limpo e a cobertura de nuvens em oitavos.

Para o registo dos valores do balanço radiativo no centro da área de estudo e nas diferentes fachadas, o radiómetro foi colocado com os instrumentos paralelamente à superfície de referência. No caso das fachadas, as componentes foram todas medidas com o radiómetro colocado

paralelamente às mesmas Todas as medições para o cálculo do balanço radiativo da área de estudo foram feitas no asfalto.

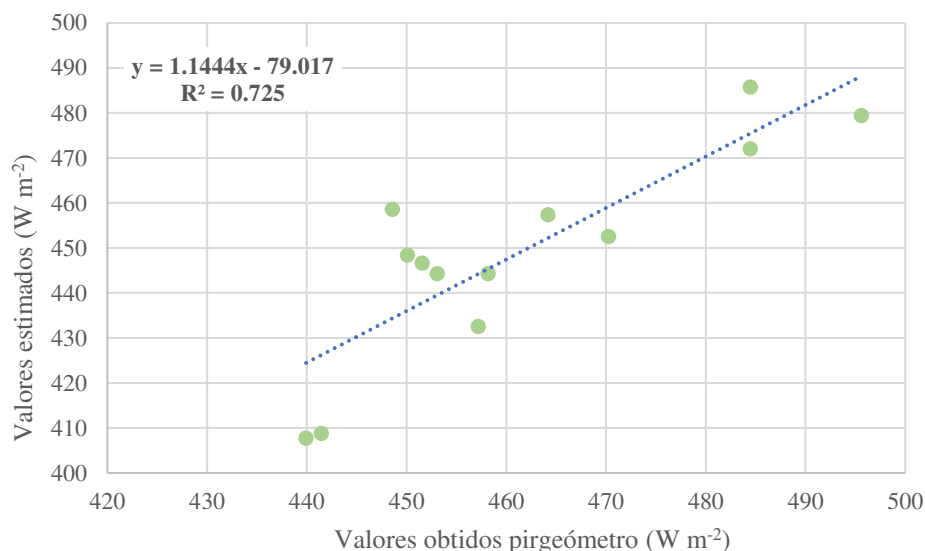


Figura 24 - Correlação entre os dados recolhidos com o pirgeómetro e os valores recolhidos com o termómetro infravermelho térmico (28 de junho e 5 de julho de 2018)

4.6. Modelação micrometeorológica tridimensional (*ENVI-met*)

Com a realização do trabalho de campo, nomeadamente, na recolha dos valores de radiação solar incidente e do balanço radiativo das superfícies apenas se consegue saber, pontualmente, o comportamento de determinadas superfícies e em certos pontos da área de estudo. Através da modelação tridimensional tentou-se perceber o comportamento destas variáveis em toda a área de estudo.

Para o cálculo do balanço radiativo da área de estudo foi utilizado um *software* de modelação tridimensional. O *ENVI-met* (versão 4.3.1), que é um modelo holístico tridimensional não hidrostático desenvolvido para simular interações entre superfícies, plantas e o ar em meio urbano, modela diferentes variáveis meteorológicas em áreas urbanas. O modelo é projetado para a microescala, com uma resolução horizontal típica de 0,5 a 5 metros, e para um período típico de 24 a 48 horas, com um intervalo de tempo de 1 a 5 segundos.

O modelo tem em consideração todo o balanço radiativo calculando a radiação direta, difusa e refletida, e ainda, a radiação de grande comprimento de onda. O *ENVI-met* simula diferentes parâmetros como o escoamento do ar em torno dos edifícios (CFD), processos de troca de calor, turbulência aerodinâmica, bioclimatologia, dispersão de partículas e poluentes mas também algumas componentes ligadas com a vegetação.

A versão utilizada (V.4, *science*) permite forçar as variáveis meteorológicas (temperatura e humidade relativa do ar) durante a simulação (Huttner e Bruse, 2009). O *ENVI-met* encontra-se

dividido em várias componentes e módulos com diferentes funções. No *Configuration Wizard* é colocada toda a informação relativa às condições iniciais para a modelação das diferentes variáveis. Dentro deste *software* há também a possibilidade de criar diferentes materiais e cores presentes na área de estudo, de forma a conseguir uma representação fiel das superfícies. O módulo *Spaces* permite fazer a modelação da área de estudo a 2 e 3 dimensões. É aqui que se procede à “construção” da área em estudo no modelo, representando as suas diferentes características. No módulo *Albero*, caso seja necessário, é possível criar diferentes tipos de vegetação que não existam na base de dados. O módulo *ENVI-met* faz o processamento das variáveis para os dias e horas seleccionados, sendo a visualização dos resultados feita no módulo *Leonardo*.

4.6.1. O balanço radiativo e a temperatura das fachadas da área de estudo

Para a modelação das variáveis climáticas, do balanço radiativo da área de estudo e da temperatura das fachadas foi construído um modelo 3D com as características apresentadas no quadro 9.

Quadro 9 - Características para o desenho do modelo 3D no *ENVI-met*

Área (células)	90 x 44 x 30
<i>Nesting grids</i>	3
Resolução das células (m)	4 x 4 x 2
Rotação do modelo	270,23°
Localização	Lisboa, Portugal
Latitude	38° 76'
Longitude	-9° 17'

A área de estudo foi reproduzida no *ENVI-met* numa área de 90 x 40 x 30 células, com uma resolução de 4 x 4 x 2m, de forma a que a geometria urbana, as propriedades físicas e as diferentes superfícies fossem replicadas de forma real (fig. 25). Ao modelo foram ainda acrescentadas 3 *nesting grids*.

Para compreender o comportamento das diferentes variáveis na área de estudo foram dispostos 6 recetores no modelo (fig. 25): todos foram colocados na célula do modelo correspondente ao local onde foram instalados os instrumentos na área de estudo, à exceção do recetor 2. Este foi colocado junto à fachada norte.

Posteriormente a todas as componentes terem sido colocadas no modelo procedeu-se ao desenho pormenorizado das fachadas, que permitiu realizar uma construção, em grande parte, fiel à realidade (fig. 26 e 27). Tentou-se, tanto quanto possível, manter a proporção, de área ocupada por janelas, em cada uma das fachadas.

De forma a conseguir uma representação mais próxima da realidade foram criadas as tonalidades correspondentes às cores existentes nas fachadas da área de estudo. Para a

representação dos telhados da área de estudo foram utilizados três tipos: telhados de telha, telhados de telha cinzenta e telhados, de terracota e cinzento.

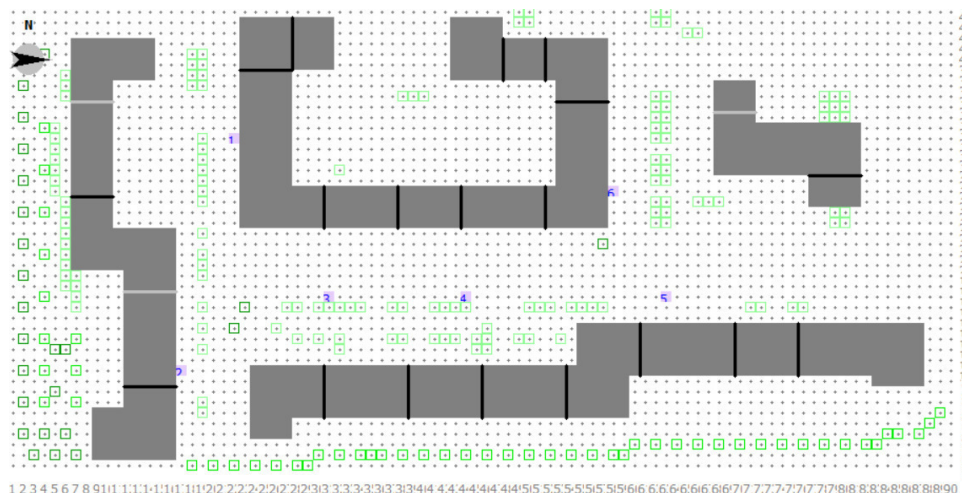


Figura 25 - Modelo da área de estudo a 2 dimensões

Legenda: a cinzento, os edifícios; verde claro, vegetação rasteira; a verde escuro, árvores e a azul, local onde foram colocados os recetores.

Uma vez que não foi disponibilizada informação sobre o tipo de material de construção dos edifícios do *canyon* urbano em estudo, todos os edifícios foram representados com o mesmo tipo de material, alterando apenas as cores das diferentes fachadas.

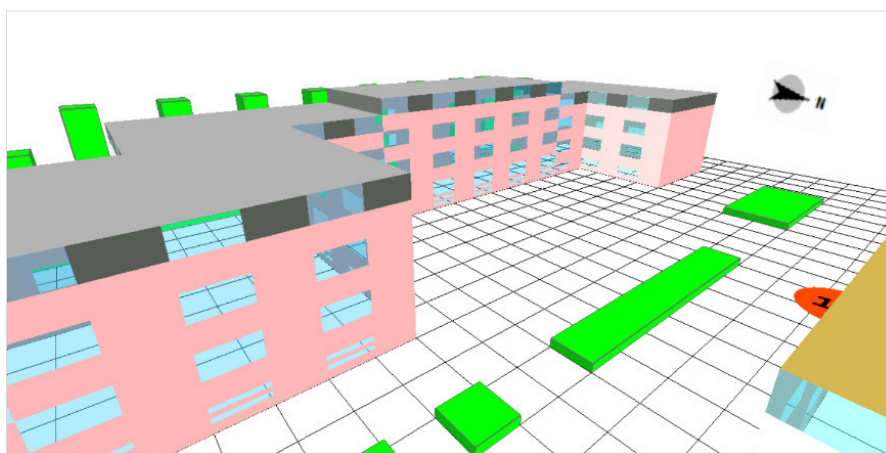


Figura 26 - Pormenor de uma das fachadas do modelo 3D para o desenho das janelas

No quadro 10 encontram-se sintetizados os principais dados de entrada no modelo *ENVI-met* para os dias que se correu o modelo. Os valores de humidade específica para os diferentes dias foram calculados a partir das reanálises do *Earth System Research Laboratory*¹⁰, da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Os restantes dados foram obtidos na estação meteorológica do IGOT para todos os dias em que foram feitas as simulações.

¹⁰ <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/profile/>

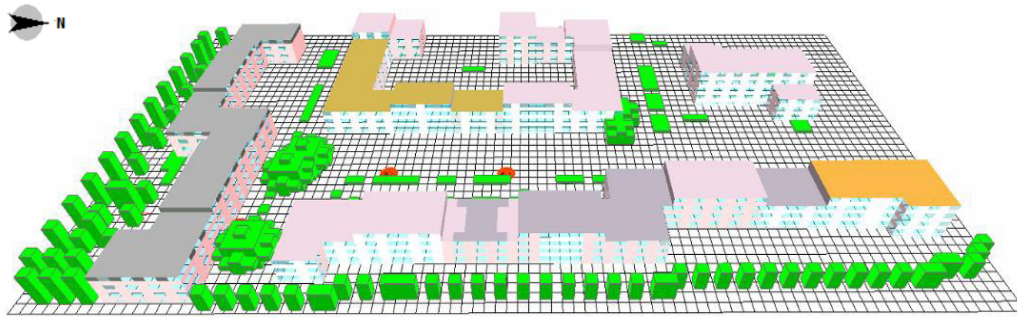


Figura 27 - Modelo da área de estudo a 3 dimensões (*ENVI-met*)

No caso dos valores da temperatura do ar foi utilizado o modelo de forçamento da temperatura do *ENVI-met*, que permite introduzir no programa dados horários de temperatura do ar para que exista um ajustamento destes valores nas diferentes horas de simulação.

Quadro 10 - Condições iniciais para a modelação no *ENVI-met*

Dia de início da simulação	20/02/2018	18/06/2018	07/07/2018
Hora do início da simulação	05:00	05:00	05:00
Total de horas de simulação	48h	48h	48h
Velocidade do vento a 10 metros (m/s)	1,3 m/s	1,3 m/s	3 m/s
Direção do vento	355 (NNW)	11 (N)	3 (N)
Temperatura do ar inicial	Modelo de forçamento da temperatura		
Humidade específica a 2500 m (g/kg)	2,65 g/kg	9,5 g/kg	7g/kg
Humidade relativa a 2 metros	44%	46%	84%

Capítulo V - Resultados

No decorrer deste trabalho foram utilizadas diferentes metodologias do âmbito da climatologia urbana e da microclimatologia. Os resultados da aplicação destas diferentes técnicas apresentam-se de seguida.

5.1. Análise das temperaturas de superfície obtidas com o satélite *Landsat 8*

5.1.1. Lisboa

Tal como foi referido anteriormente as temperaturas de superfície (T_s) foram calculadas para a área de estudo nas quatro estações do ano, através de imagens do satélite *Landsat 8*, com base na metodologia de Ndossi e Avdan (2016).

A cartografia da figura 28 mostra as temperaturas de superfície matinais calculadas em Lisboa. De acordo com os resultados obtidos, a parte norte da cidade de Lisboa apresenta, na primavera, no verão e no outono T_s mais elevadas do que a parte central e junto ao Tejo, em particular, em Alvalade, Carnide, Lumiar, Olivais e Santa Clara. No inverno, as temperaturas mais elevadas encontram-se distribuídas pela cidade, exceto na área de Monsanto e na freguesia do Parque das Nações, que se encontram, tal como nas outras estações, mais frescos do que a restante área do concelho.

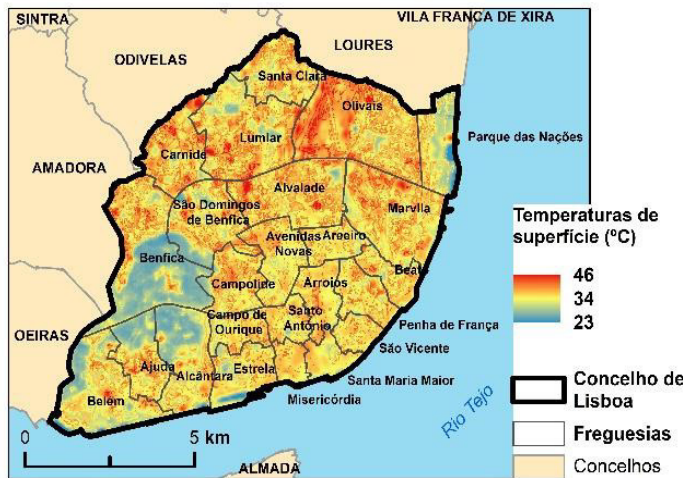
No verão, as T_s mais baixas foram registadas na área do Parque Florestal de Monsanto e na parte sudoeste do concelho, nas freguesias de Belém, Ajuda, Alcântara, Estrela e Benfica, enquanto as mais elevadas se registaram nas freguesias do norte da cidade.

No período de outono as T_s variaram entre os 23°C e os 43°C no concelho de Lisboa, destacando-se as áreas do aeroporto e das freguesias limítrofes com as temperaturas mais elevadas. O centro da cidade encontrava-se mais fresco, assim como a área do Parque das Nações.

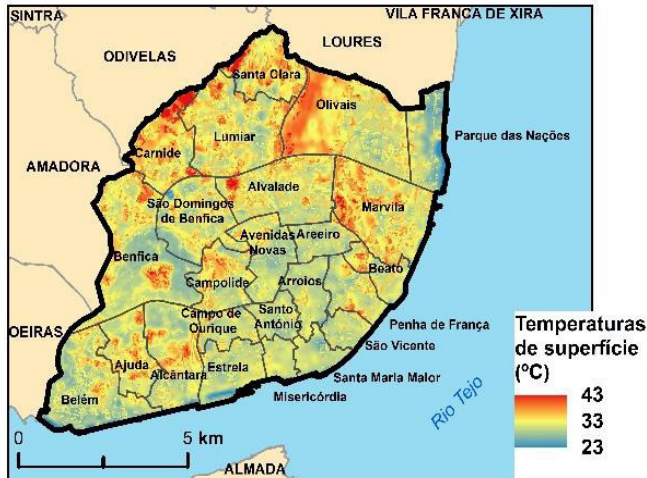
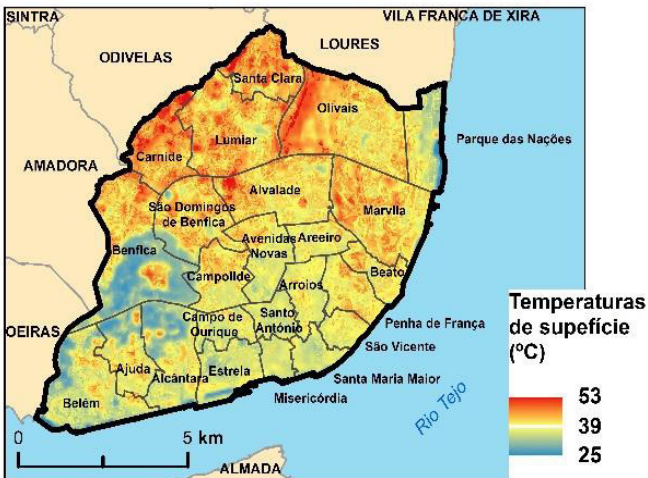
No inverno, as T_s variaram entre os 15°C e os 31°C, estando as mais elevadas associadas a locais como as freguesias de Belém, Ajuda, Alcântara e Marvila. Tal como nas outras estações, a área de Monsanto registou as temperaturas mais baixas mas também a área do Parque das Nações, e as freguesias de Arroios e Areeiro.

A análise das T_s para a cidade de Lisboa permitiu perceber que na área da serra de Monsanto se concentram as temperaturas mais baixas. Para além disso, as IUC de superfície encontram-se distribuídas no norte da cidade.

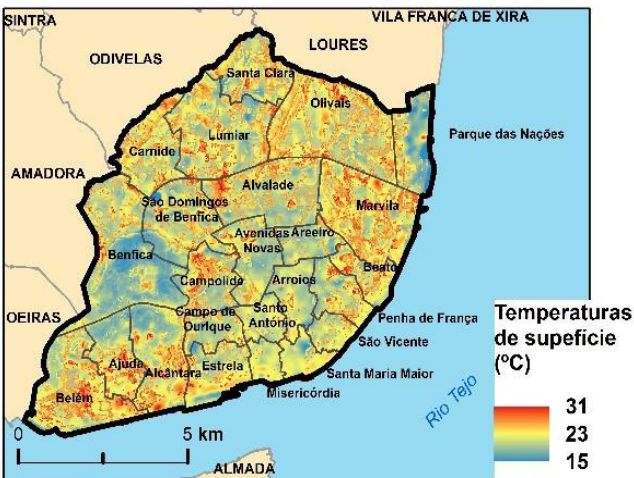
PRIMAVERA



VERÃO



OUTONO



INVERNO

Figura 28 - Temperaturas de superfície para o concelho de Lisboa calculadas com base em imagens Landsat 8

5.1.2. Lumiar/Telheiras

Na figura 29 apresenta-se a variação das T_s no norte da cidade (Lumiar) e na área de pormenor deste trabalho (Telheiras). No período de primavera, em que as T_s no concelho de Lisboa variaram entre os 23°C e os 46°C, na área de pormenor as T_s eram superiores a 30°C, registando-se na parte mais a norte as temperaturas mais elevadas ($\approx 38^\circ\text{C}$).

Na freguesia do Lumiar, no verão, a T_s mais baixa registada foi de 36°C e a máxima de 50°C. Já na área de pormenor, as temperaturas registadas eram de $\approx 39,5^\circ\text{C}$. No outono as T_s registadas variaram entre os 30°C e os 32°C. No período de inverno a temperatura mínima registada foi de 20°C e a máxima de 21°C.

De uma forma geral, em todas as estações do ano, quer à escala da cidade Lisboa quer à escala da freguesia do Lumiar, as temperaturas mais baixas podem ser associadas aos locais ocupados por vegetação e as mais elevadas às áreas sem ocupação ou ocupados apenas por vegetação herbácea rasteira, como é o caso do aeroporto, por exemplo. As temperaturas mais elevadas também podem ser associadas aos locais onde há mais infraestruturas e menos quantidade de vegetação.

5.2. As temperaturas das fachadas e outras superfícies da área de estudo

Durante os vários dias de trabalho de campo as temperaturas das fachadas e das superfícies da área de estudo foram registadas com recurso a uma câmara térmica FLIR. Tal como foi referido na metodologia, foram recolhidas imagens térmicas para três dias diferentes: um no inverno, outro na primavera e o último no verão. O trabalho de campo realizado no dia de verão realizou-se entre as 9h e as 19h. A análise das temperaturas de superfície foi feita tendo em conta a exposição predominante das superfícies. Neste estudo as janelas não foram consideradas para a estatística realizada. Uma vez que o presente trabalho se apresenta como pioneiro, o texto apresentado é muito descritivo.

5.2.1. Análise das temperaturas de superfície (inverno)

No dia em que se realizou a recolha das imagens térmicas no inverno, a temperatura de superfície das fachadas da área de estudo não ultrapassou os 27°C. Estas imagens foram recolhidas no período da manhã e, por isso, a fachada oeste encontrava-se a receber radiação solar.

As figuras 30 e 31 (e respetivos histogramas de frequências) mostram as temperaturas registadas nas fachadas este e sul. Analisando todos os valores recolhidos na fachada este (fig.30) as temperaturas mais elevadas registaram-se nos locais onde a fachada se encontra pintada de rosa escuro (Sp1, 21,9°C e Sp3, 23,2°C) e as mais baixas em locais onde a fachada está pintada de branco (Sp2, 19,5°C e Sp4, 15,3°C). Na fachada sul (fig. 31) as temperaturas recolhidas variaram

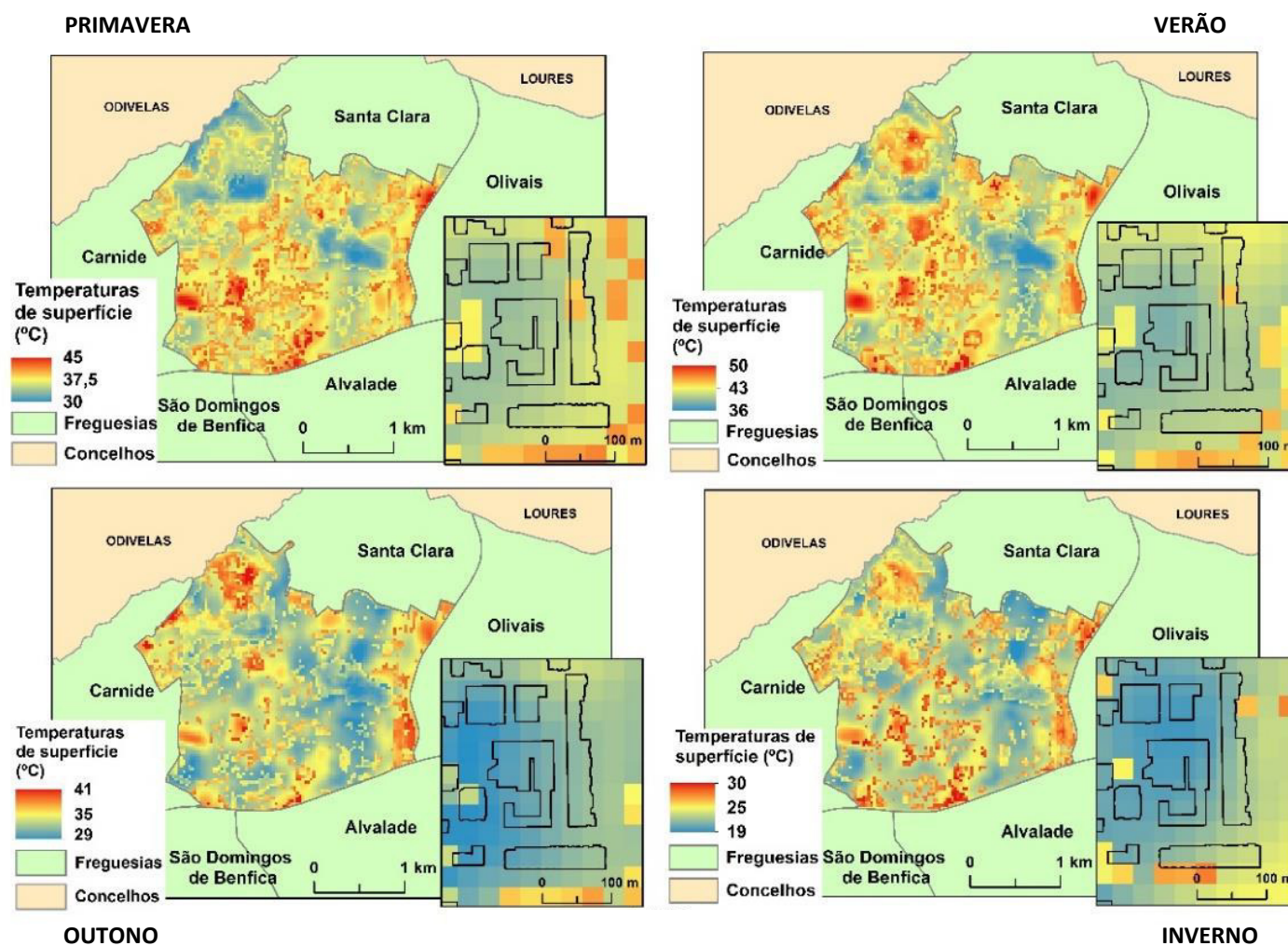


Figura 29- Temperaturas de superfície para a freguesia do Lumiar e área de pormenor calculadas com base em imagens Landsat 8

entre os 14,1°C e os 26,5°C. As temperaturas mais baixas foram registadas, tal como na fachada este, nos locais onde a fachada é de cor branca ou cinzenta (Sp2 e Sp4) e as mais elevadas onde a fachada é cor de rosa.

Nas fachadas oeste e norte a temperatura de superfície variou entre os 11,7°C e 16,5°C. Na fachada oeste (fig. 32) cujas temperaturas registadas variaram entre os 11,7°C e os 16,5°C, as mais elevadas registaram-se, tal como na fachada norte, nos locais onde a cor é rosa, variando entre os 14,3°C e os 15,6°C. As temperaturas mais baixas registaram-se nos locais onde a fachada é branca, sendo que as temperaturas mais baixas variaram entre os 12,3°C e os 13,7°C. Na imagem térmica da figura 33, parte da fachada norte ainda se encontrava à sombra, as temperaturas mais baixas (entre os 11,7°C e os 12°C) registaram-se em locais onde a fachada está pintada de branco. As mais elevadas (entre os 12,6°C e os 14,4°C) registaram-se onde a fachada é rosa ou cinzenta.

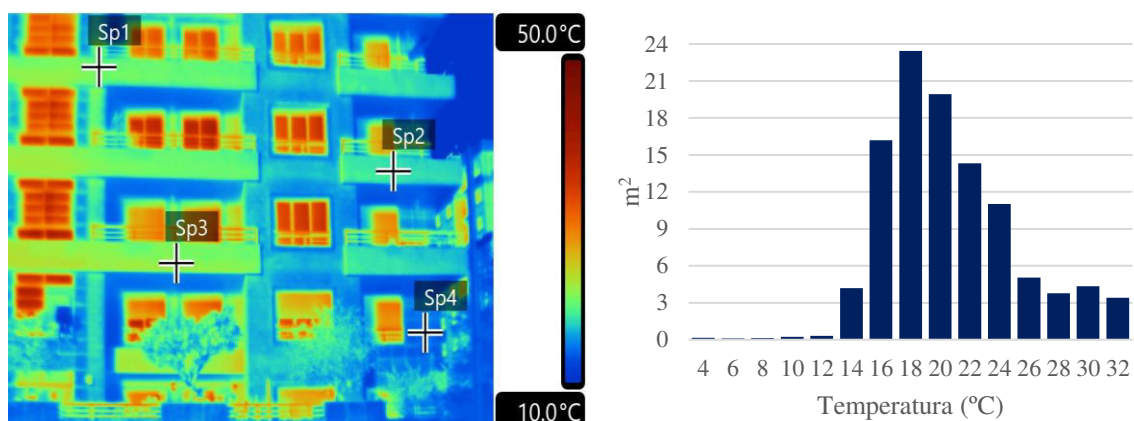


Figura 31 - Imagem térmica de inverno da fachada este e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 21,9°C, Sp2 = 19,5°C, Sp3= 23,2°C, Sp4= 15,3°C.

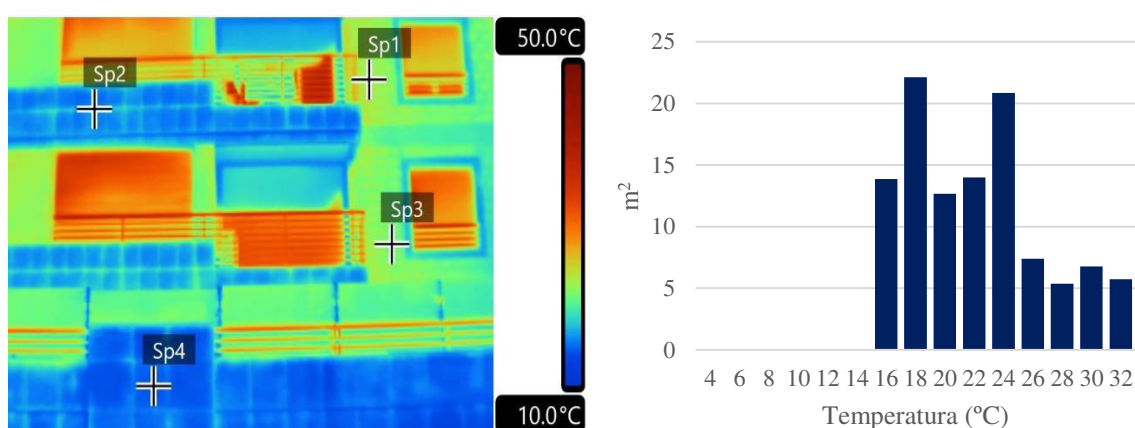


Figura 30 - Imagem térmica de inverno da fachada sul e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1=24,9°C, Sp2= 18,6°C, Sp3=22,4°C, Sp4= 14,5°C.

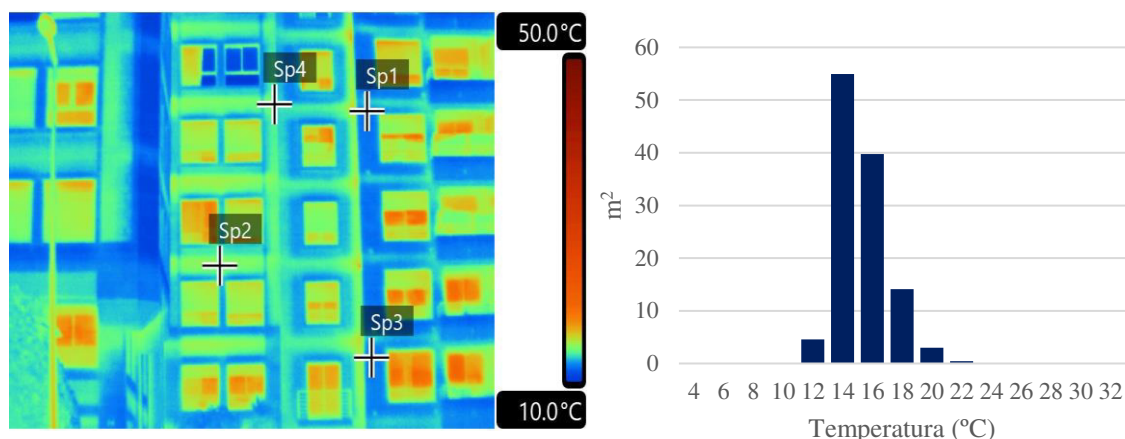


Figura 32 - Imagem térmica de inverno da fachada oeste e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 12,5°C, Sp2= 15,2, Sp3= 12,7°C, Sp4= 14,5°C.

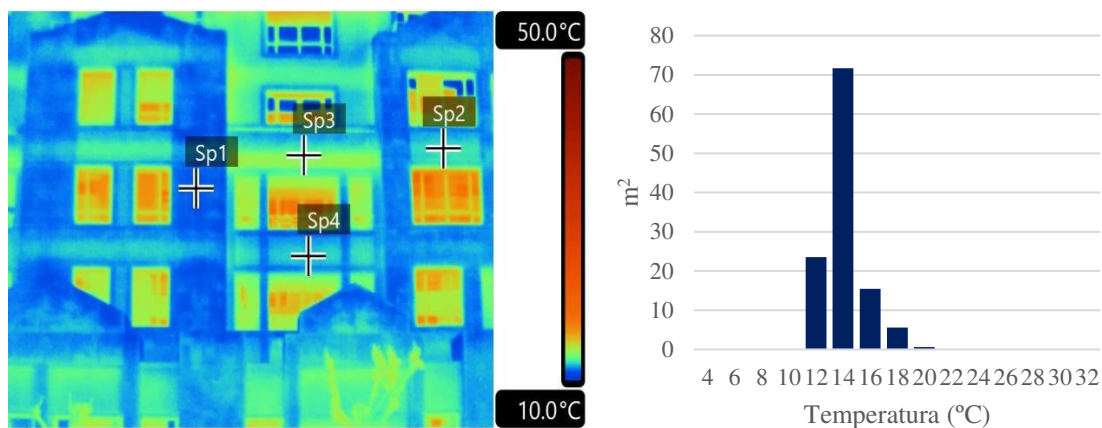


Figura 33 - Imagem térmica de inverno da fachada norte e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 11,7°C, Sp2= 13°C, Sp3= 14,4°C, Sp4= 12,7°C.

5.2.2. Análise das temperaturas de superfície (primavera)

As imagens térmicas apresentadas nas figuras 34 a 37 mostram as temperaturas de superfície registadas em cada uma das fachadas no dia em que foram recolhidas na primavera. Neste dia as temperaturas de superfície variaram entre os 27,7°C e os 37,7°C, tendo as mais elevadas sido registadas na fachada sul e as mais baixas na fachada norte.

Na fachada norte (fig. 34) as temperaturas mais baixas foram registadas nos locais onde esta se encontra pintada de branco (Sp2, 32,8°C e Sp3, 33,3°C). As mais elevadas, tal como no inverno, registam-se nas cores cinzento e rosa. Na fachada sul (fig. 35), onde se registaram as temperaturas mais elevadas deste dia, a temperatura máxima foi de 39°C e a mínima de 35,1°C, com uma temperatura média de 37,5°C. Na imagem térmica os locais que se encontram com temperaturas muito elevadas são vidros existentes nas varandas, que aquecem muito quando há radiação solar incidente.

Na fachada oeste (fig. 36) a temperatura máxima registada foi de 37°C. Na fachada este (fig. 37) as temperaturas de superfície variaram entre os 32°C e os 37,5°C. Nesta fachada a temperatura média foi de 34,2°C. As temperaturas mais elevadas foram atingidas em locais como o Sp3 (37,1°C). Neste dia as imagens térmicas foram recolhidas entre as 15h e as 16h e, portanto, esta fachada já não se encontrava a receber radiação solar.

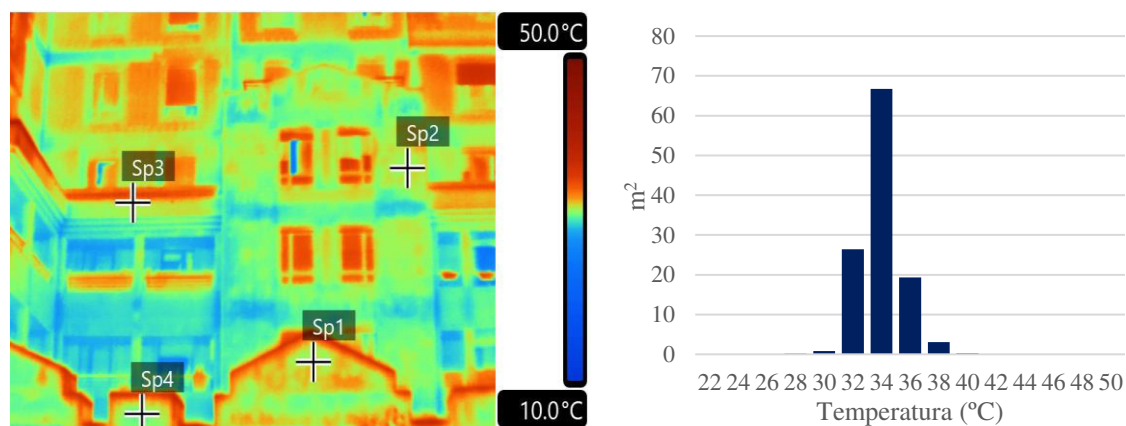


Figura 35 - Imagem térmica na primavera da fachada norte e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 33,8°C, Sp2= 32,8°C, Sp3= 33,3°C, Sp4= 33,5°C.

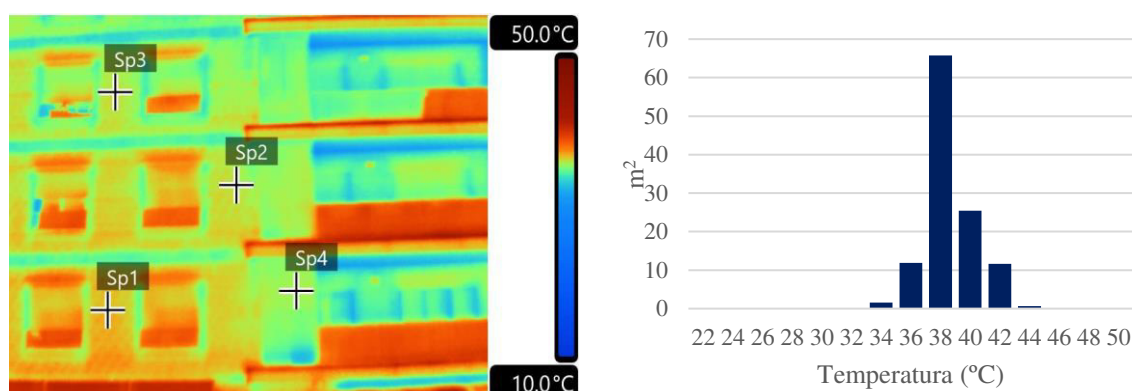


Figura 34 - Imagem térmica na primavera da fachada sul e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 38,1°C, Sp2= 37,4°C, Sp3= 37,6°C, Sp4= 37,2°C.

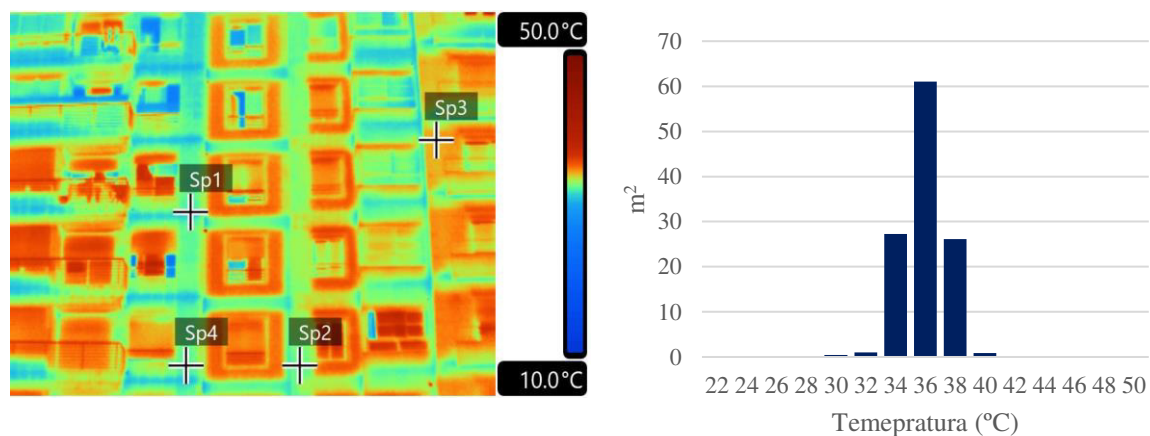


Figura 36 - Imagem térmica na primavera da fachada oeste e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 33,1°C, Sp2= 33,9°C, Sp3= 35,5°C, Sp4= 33,6°C.

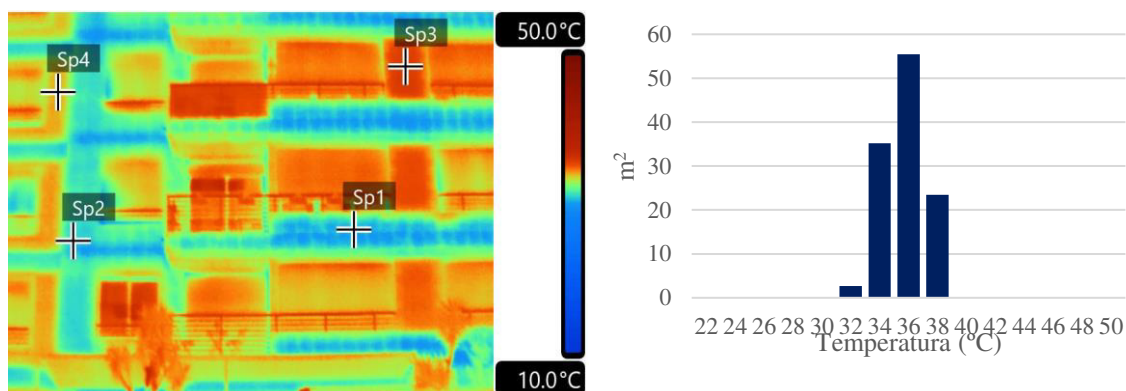


Figura 37 - Imagem térmica da fachada este no período da primavera e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 32,3°C, Sp2= 32,5°C, Sp3= 37,1°C, Sp4= 35,6°C.

5.2.3. Análise das temperaturas de superfície (verão)

Contrastes N/S

No período de verão o trabalho de campo foi realizado no dia 7 de julho de 2018 e as temperaturas registradas nas fachadas da área de estudo foram recolhidas em quatro diferentes horas do dia: 9:00 UTC +1, 13:00 UTC +1 15:00 UTC+1 e 19:00 UTC +1.

Na figura 38 mostra-se a temperatura na fachada sul às 15h, hora em que se registou a temperatura mais elevada e o quadro 11 as temperaturas máxima, mínima e média registradas em toda a fachada sul, ao longo do dia. A temperatura média mais elevada de toda a fachada também foi registrada às 15h.

Quadro 11 - Temperaturas máxima, mínima e média registradas na fachada sul ao longo do dia no período de verão

	Fachada sul - Verão			
	9h	13h	15h	19h
T. mín.	19,4°C	24 °C	26,5 °C	24,8 °C
T. máx.	21,8 °C	28,9 °C	34,5 °C	32,2 °C
T. méd.	20,4 °C	26 °C	31,2 °C	28,6 °C

A figura 39 mostra a temperatura da fachada norte quando a temperatura de superfície mais elevada foi atingida (19h) e o quadro 12 as temperaturas máxima, mínima e média registradas em toda a fachada sul ao longo do dia. Tal como na fachada sul a temperatura média mais elevada em toda a fachada foi registrada à hora em que se verificou a temperatura máxima mais elevada.

Quadro 12 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada norte ao longo do dia no período de verão

	Fachada norte - Verão			
	9h	13h	15h	19h
T. mín.	18,1 °C	21,8 °C	23,6 °C	19,8 °C
T. máx.	20,9 °C	27,2 °C	32,2 °C	32,4 °C
T. méd.	18,9 °C	23,5 °C	26,5 °C	27,5 °C

A análise das imagens térmicas recolhidas nestas duas fachadas permitiu ver que entre as 9h e as 15h, a fachada sul apresentou sempre temperaturas mínimas e máximas superiores às registadas na fachada norte. A única exceção ocorreu às 19h quando na fachada norte se registou uma temperatura máxima ligeiramente superior à registada na fachada sul.

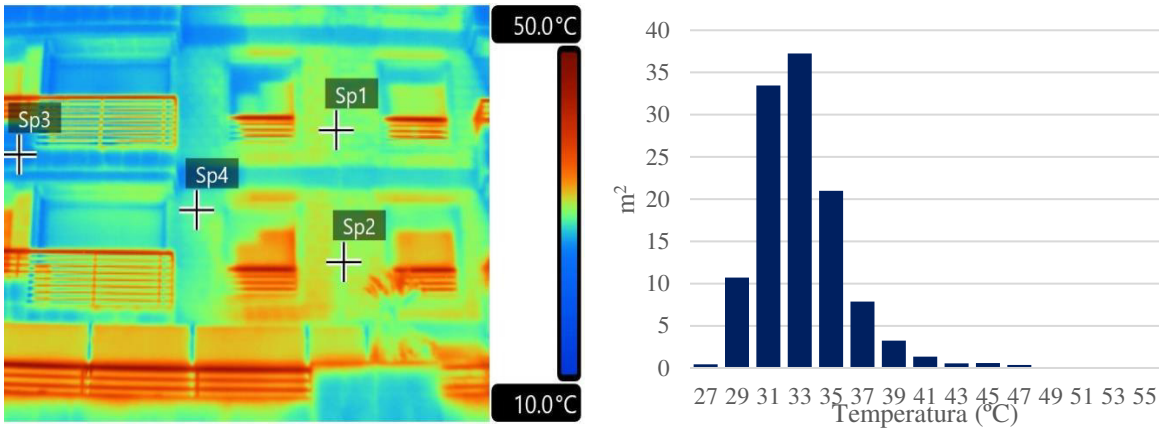


Figura 39 - Imagem térmica de verão da fachada sul (15h) e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 31,9°C, Sp2= 32,3°C, Sp3= 27,3°C, Sp4= 31,2°C.

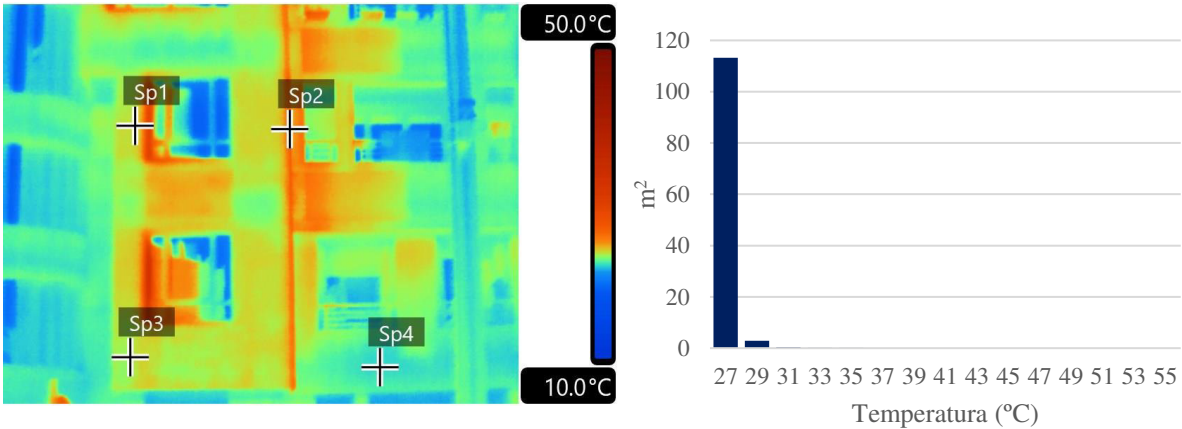


Figura 38 - Imagem térmica de verão da fachada norte (19h) e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1=25,6 °C, Sp2= 27,5 °C, Sp3=25,1°C, Sp4=23,8°C.

Contrastes E/O

Na fachada este as temperaturas de superfície mais elevadas registaram-se às 13h. A figura 40 mostra a temperatura registada da nesta fachada a esta hora e o quadro 13 sintetiza os valores das temperaturas média, máxima e mínima registadas em toda a fachada ao longo do dia.

Quadro 13 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada norte ao longo do dia no período de verão

	Fachada este - Verão			
	9h	13h	15h	19h
T. mín.	20,1 °C	13 °C	20,9 °C	20,1 °C
T. máx.	25,3 °C	39,1 °C	34,6 °C	27,2 °C
T. méd.	21,7 °C	27,4 °C	27,6 °C	24,5 °C

A fachada oeste, que apenas recebe radiação solar direta no período da tarde, registou as temperaturas mais elevadas nesse mesmo período, especialmente às 19h (fig. 41 e quadro 14).

Quadro 14 - Temperaturas máxima, mínima e média registadas na fachada oeste ao longo do dia no período de verão

	Fachada oeste - Verão			
	9h	13h	15h	19h
T. mín.	19,9 °C	22,6 °C	25,3 °C	23,5 °C
T. máx.	23,19 °C	29,7 °C	38,1 °C	35,1 °C
T. méd.	22,2 °C	24,1 °C	27,6 °C	28,6 °C

A análise das imagens térmicas recolhidas nas fachadas este e oeste permitiu ver que no período da manhã a fachada este apresenta temperaturas mais elevadas do que a fachada oeste, uma vez que se encontra a receber radiação solar direta. Já no período da tarde nota-se o contrário, estando a fachada oeste mais aquecida. No entanto, analisando as diferenças de temperatura entre as duas, embora a fachada este receba radiação durante quase todo o período da manhã e a fachada oeste apenas comece a receber radiação depois das 13h40 e termine pouco depois das 19h, as temperaturas atingidas pela última são mais elevadas do que as registadas no período da manhã na fachada este.

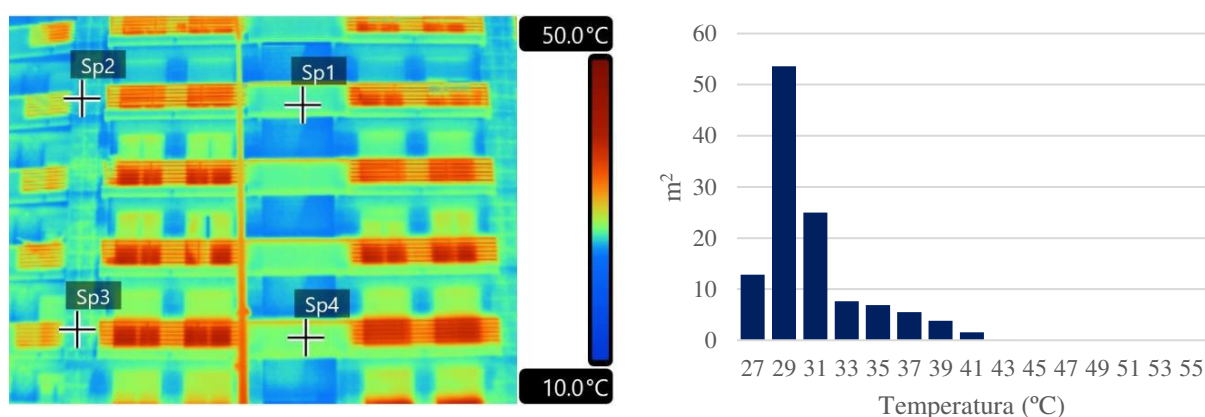


Figura 40 - Imagem térmica de verão da fachada oeste (15h) e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 28,5°C, Sp2= 27,8°C, Sp3= 29,1°C, Sp4=29,3°C.

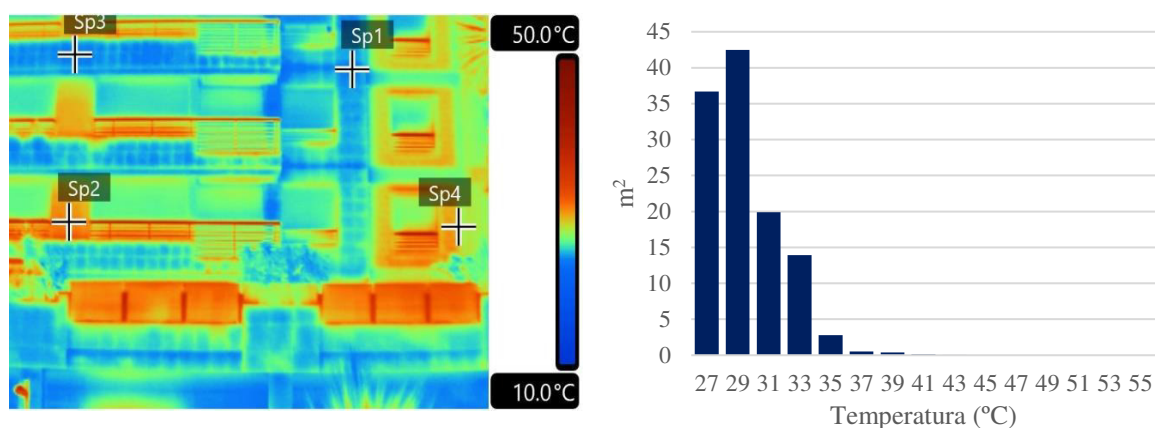


Figura 41 - Imagem térmica de verão da fachada este (13h) e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 25,1°C, Sp2= 32,1, Sp3= 25,3°C, Sp4=29,6°C.

5.2.4. A temperatura de outras superfícies na primavera e no verão

Nos períodos da primavera e de verão também foram recolhidas imagens térmicas dos diferentes materiais utilizados nas superfícies da área de estudo: calçada, pavimento em azulejo e asfalto. As diferenças encontradas permitem desde logo ver que o asfalto é o tipo de material que apresenta, quase sempre, as temperaturas mais elevadas, quando comparado com as temperaturas registadas nos outros materiais analisados.

No período da primavera, em que o dia escolhido foi excecionalmente quente, as temperaturas atingidas pelas diferentes superfícies foram elevadas. No caso do asfalto, exposto à radiação solar, a temperatura máxima atingida foi de 60,6°C e a mínima de 49°C. A temperatura média (de todas as fotografias recolhidas) deste tipo de material foi de 45,1°C. A figura 42 mostra uma das imagens térmicas recolhidas das temperaturas de superfície registadas neste tipo de material.

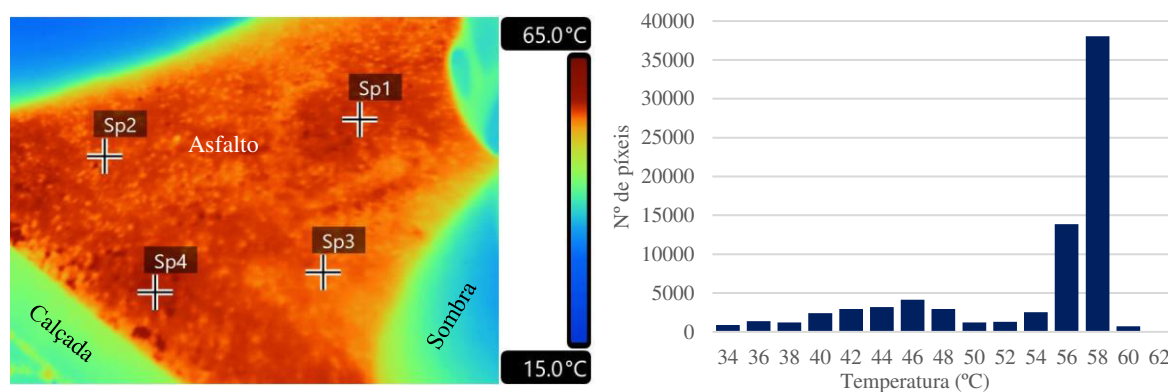


Figura 42 - Imagem térmica do asfalto na primavera à tarde (15h) e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 57,3°C, Sp2= 56,8°C, Sp3= 56,6°C, Sp4= 58,6°C.

No caso do pavimento em azulejo a temperatura máxima atingida foi de 44,9°C e a mínima de 38,3°C, registando uma temperatura média de 40°C. Também o pavimento (fig. 43), tal como o asfalto, estava a receber radiação solar no momento da recolha dos termogramas.

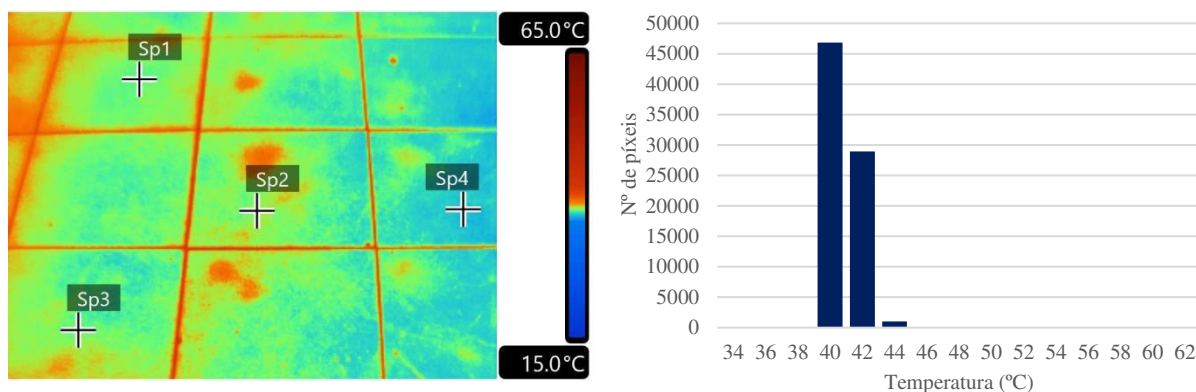


Figura 43 - Imagem térmica do pavimento na primavera à tarde e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 39,7°C, Sp2= 40,3°C, Sp3=39,8°C, Sp4= 39°C.

No caso da calçada portuguesa de cor clara as temperaturas máxima e mínima foram, respetivamente, 54,1°C e 30,6°C, com uma temperatura média de 45,1°C. As fotografias deste tipo de material também foram recolhidas quando as superfícies se encontravam a receber radiação solar (fig. 44).

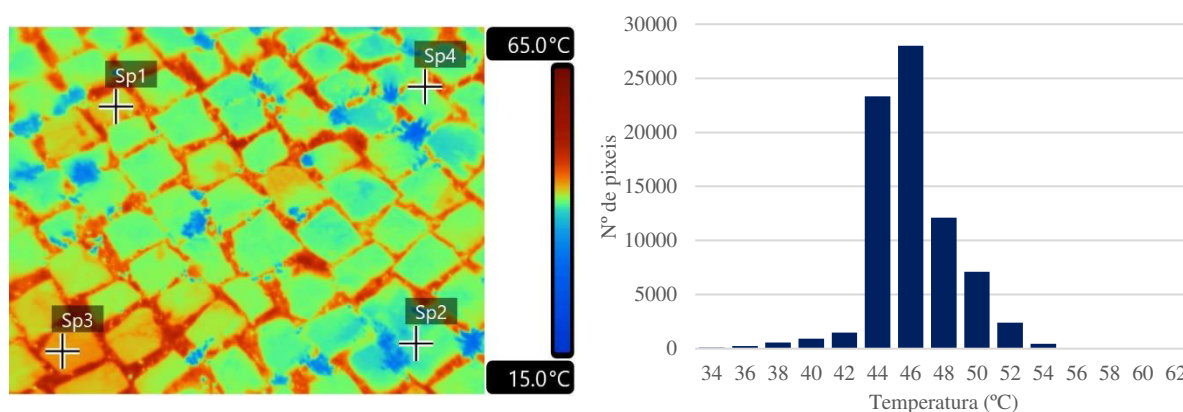


Figura 44 - Imagem térmica da calçada na primavera à tarde e histograma correspondente
Temperaturas pontuais: Sp1= 46°C, Sp2= 43,3°C, Sp3=46,9°C, Sp4= 43,9°C.

Neste dia o pavimento foi o tipo de material em que se registaram as temperaturas mais baixas, em comparação com o asfalto que registou temperaturas superiores, em média, de mais 14°C.

No dia 7 de julho foram recolhidas imagens térmicas dos três tipos de material em quatro momentos diferentes (9:00 UTC +1, 13:00 UTC +1, 15:00 UTC +1 e 19:00 UTC +1). Neste dia as temperaturas mais elevadas foram atingidas entre as 13h e as 15h. Os quadros 15 a 17, sintetizam as temperaturas registadas em cada tipo de material estudado. Nos quadros 18 a 20 apresentam-se as diferenças encontradas entre cada material. No caso da calçada a temperatura

máxima foi registada às 13h, enquanto que no asfalto a temperatura máxima mais elevada apenas foi registada às 15h. A temperatura máxima mais elevada no pavimento foi registada às 15h.

Comparando as temperaturas atingidas pelos diferentes tipos de materiais observou-se que o asfalto se encontra, em média, 6,3°C mais aquecido do que a calçada e cerca de 13°C, quando comparado com os valores obtidos no pavimento, no período da manhã (9h). Já às 13h estas diferenças acentuam-se, passando, em média, para 9,7°C em relação à calçada e para 19,8°C relativamente ao pavimento. Já no período da tarde (15h) as diferenças acentuam-se ainda mais, no caso da calçada, para 13,1°C, em média. Quando comparado com as temperaturas atingidas pelo pavimento, a diferença entre as temperaturas registadas no asfalto e o pavimento desce ligeiramente, para 19,3°C. Isto pode ser explicado pelo facto de a esta hora o pavimento já se encontrar a receber radiação solar direta. Às 19h a diferença média de temperaturas entre o asfalto e a calçada é de 8,5°C. A esta hora o pavimento encontrava-se mais aquecido do que o asfalto, por este último já não estar a receber radiação solar direta. Comparando as temperaturas atingidas pelo pavimento e pela calçada, o pavimento está sempre mais fresco do que a calçada, à exceção do período das 19h, em que a calçada apresenta temperaturas superiores, em média, de 9,5°C, mesmo já não estando a receber radiação solar direta.

Quadro 15 - Temperaturas registadas na calçada (verão)

	9h	13h	15h	19h
T. mín.	20,6°C	29,3°C	30,6°C	23,6°C
T. máx.	36°C	56,6°C	54,8°C	29,3°C
T. méd.	25,3°C	42,2°C	42,4°C	27,8°C

Quadro 16 - Temperaturas registadas no asfalto (verão)

	9h	13h	15h	19h
T. mín.	28,4°C	47,6°C	47°C	30,6°C
T. máx.	37,8°C	54,4°C	58,4°C	38°C
T. méd.	31,6°C	51,9°C	55,5°C	36,3°C

Quadro 17 - Temperaturas registadas no pavimento (verão)

	9h	13h	15h	19h
T. mín.	17,3°C	30,3°C	34,7°C	36,1°C
T. máx.	20,8°C	36,1°C	42,1 °C	40,2°C
T. méd.	18,2°C	32,1°C	36,2 °C	37,3°C

Quadro 18 - Diferença de temperaturas entre o asfalto e a calçada

	9h	13h	15h	19h
T. mín.	7,8°C	18,3°C	16,4°C	7°C
T. máx.	1,8°C	-2,2°C	3,6°C	8,7°C
T. méd.	6,3°C	9,7°C	13,1°C	8,5°C

Quadro 19 - Diferença de temperaturas entre o asfalto e o pavimento

	9h	13h	15h	19h
T. mín.	7,6°C	17,3°C	12,3°C	-5,5°C
T. máx.	20,5°C	18,3°C	16,3°C	-2,2°C
T. méd.	13,4°C	19,8°C	19,3°C	-1°C

Quadro 20 – Diferença de temperaturas entre a calçada e o pavimento

	9h	13h	15h	19h
T. mín.	0,2°C	1°C	4,1°C	12,5°C
T. máx.	-18,7°C	-20,5°C	-12,7°C	10,9°C
T. méd.	-7,1°C	-10,1°C	-6,2°C	9,5°C

5.3. Balanço radiativo (Q^*) das fachadas e superfícies urbanas

No dia 7 de julho foram também recolhidas as várias componentes do balanço radiativo das fachadas e das diferentes superfícies urbanas da área de estudo (quadro 21 e fig. 45).

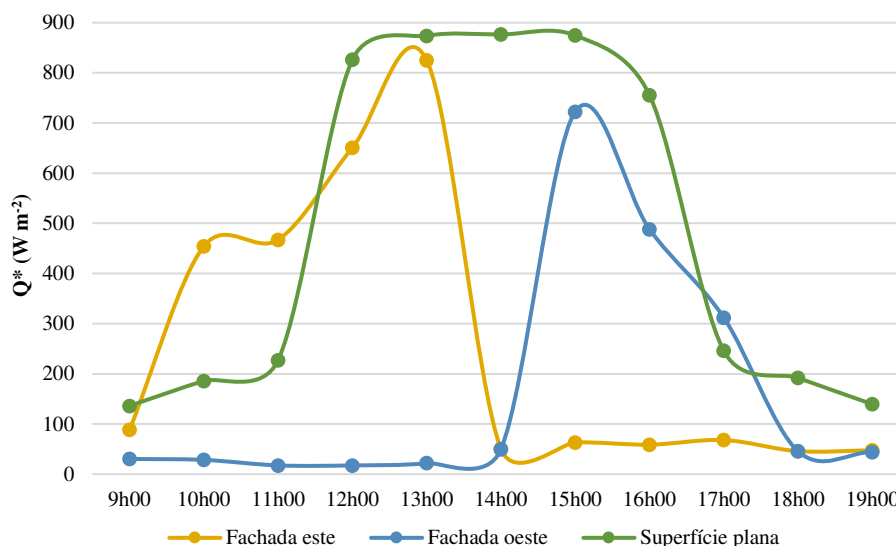


Figura 45 – Balanço radiativo das fachadas este e oeste e da área de estudo (7 de julho de 2018)

Neste dia em particular o balanço de radiação da área de estudo foi sempre inferior a 900 W m^{-2} , tendo-se verificado, entre as 11:00 UTC +1 e as 15:00 UTC +1 os valores mais elevados. Durante o período da manhã (até às 14h) o balanço de radiação da fachada este foi superior ao da fachada oeste, período durante o qual se encontrava a receber radiação solar. Entre as 14h e as 18h é a fachada oeste que apresenta os valores mais elevados.

Para estas duas fachadas também foram recolhidos valores para duas horas específicas, em que o sol apresenta a mesma elevação, e ambas se encontravam a receber radiação solar. A fachada este, cujos valores foram recolhidos às 10h30, apresentava um balanço de radiação $\approx 437 \text{ W m}^{-2}$ e a fachada oeste, para a qual foram recolhidos valores às 17h00, apresentava um balanço de radiação de $\approx 973 \text{ W m}^{-2}$.

Para as fachadas norte e sul foi calculado o balanço radiativo na hora em que o sol apresentava a sua elevação máxima (13h40 UTC +1). A esta hora a fachada sul apresentava um balanço radiativo de $\approx 632 \text{ W m}^{-2}$ e a fachada norte de $\approx 559 \text{ W m}^{-2}$.

Foram também recolhidos valores para os diferentes materiais em três horas: 9:00 UTC +1, 13 UTC +1 e 19 UTC +1. No quadro 22 apresenta-se o balanço radiativo para os três tipos de materiais utilizados nas superfícies da área de estudo. Os valores mais elevados foram registados no asfalto, tanto às 9h como às 18h. Às 13 horas foi no pavimento que se registou o valor mais elevado (888 W m^{-2}).

Quadro 21 - Componentes do balanço radiativo calculadas para as fachadas este e oeste e para a área de estudo (W m^{-2})

Hora UTC +1	Direção	Fachada este			Fachada oeste			Área Estudo		
		L	K	Q*	L	K	Q*	L	K	Q*
9h00	↑	565,3	70,2	88,4	565,3	70,2	30,4	576,3	57,3	136,2
	↓	554,3	147,6		554,3	89,6		543,3	160,5	
10h00	↑	558,6	386,3	454,3	560,2	96,0	28,4	560,2	63,8	185,9
	↓	536,6	818,6		538,2	102,5		516,3	205,7	
11h00	↑	593	386,3	467,2	569,2	83,1	17,5	593	50,8	227,3
	↓	571	831,5		558,2	89,6		527	212,1	
12h00	↑	611,5	315,4	650,6	582	70,2	17,5	660,7	141,2	826,1
	↓	580,2	934,8		571	76,7		550,8	857,3	
13h00	↑	616,6	192,8	825,4	574,5	57,3	22,0	688,3	128,3	873,9
	↓	693,6	941,2		565,4	70,2		556,3	870,2	
14h00	↑	609	96	50,4	574,2	83,1	49,5	711,6	121,8	876,5
	↓	565	102,5		550,5	108,9		557,7	844,4	
15h00	↑	601,7	63,8	63,3	588,9	173,4	722,6	729,9	121,8	874,6
	↓	557,7	83,1		588,9	896,0		565	831,5	
16h00	↑	598	76,7	58,8	621,9	502,5	488,4	708	96	755,8
	↓	565	102,5		610,9	979,9		565	709	
17h00	↑	592,7	76,7	68	625,7	463,8	312,3	693,4	44,4	246,1
	↓	550,5	102,5		603,7	754,1		550,5	147,6	
18h00	↑	582,5	89,6	45,9	593,5	63,6	45,8	650,2	44,4	191,9
	↓	549,5	102,5		560,5	76,7		529,2	115,4	
19h00	↑	579	70,2	47,6	580,7	50,8	44,2	613,7	44,4	139,6
	↓	544,3	83,1		549,5	63,8		525,8	96,0	

Nota: ↑ e ↓ mostram a direção das componentes do balanço radiativo: ascendente e descendente, respetivamente.

Quadro 22 – Q* dos diferentes materiais utilizados nas superfícies da área de estudo (W m^{-2})

Hora	Materiais		
	Asfalto	Calçada	Pavimento
9h00	136,2	105,9	69,1
13h00	873,9	724,8	888,0
19h00	191,9	125,9	136,9

5.4. Modelação tridimensional com o ENVI-met

Através da modelação tridimensional realizada obtiveram-se resultados relativamente à temperatura do ar, à temperatura das fachadas e do seu balanço radiativo (Q^*) para toda a área de estudo, cuja análise permitiu perceber se o modelo utilizado é adequado para a modelação microclimática das diferentes variáveis recolhidas no trabalho de campo e generalizar para as restantes superfícies não medidas.

5.4.1. Temperatura do ar

Para os dias de trabalho de campo realizados na primavera e no verão, através dos recetores colocados no modelo, foram analisadas as temperaturas do ar modeladas através do ENVI-met. Para o dia 21 de fevereiro de 2018 não se realizou esta análise por não ser possível comparar com dados recolhidos no campo, já que a rede microclimática apenas foi instalada em abril.

Relativamente ao dia 18 de junho de 2018 (fig. 46), o modelo estimou temperaturas na área de estudo entre 25°C e 36°C, sendo os valores mais elevados no período da manhã registados nos locais onde os recetores 1 e 3 foram colocados e, a meio do dia, no local onde se encontra o recetor 5. As temperaturas mais elevadas foram registadas entre as 14h e as 19h, e os valores máximos às 16h30. No período da tarde os valores mais elevados foram registados, novamente nos recetores 1 e 3, o primeiro localizado na rua com orientação este/oeste e o segundo na rua com orientação norte/sul.

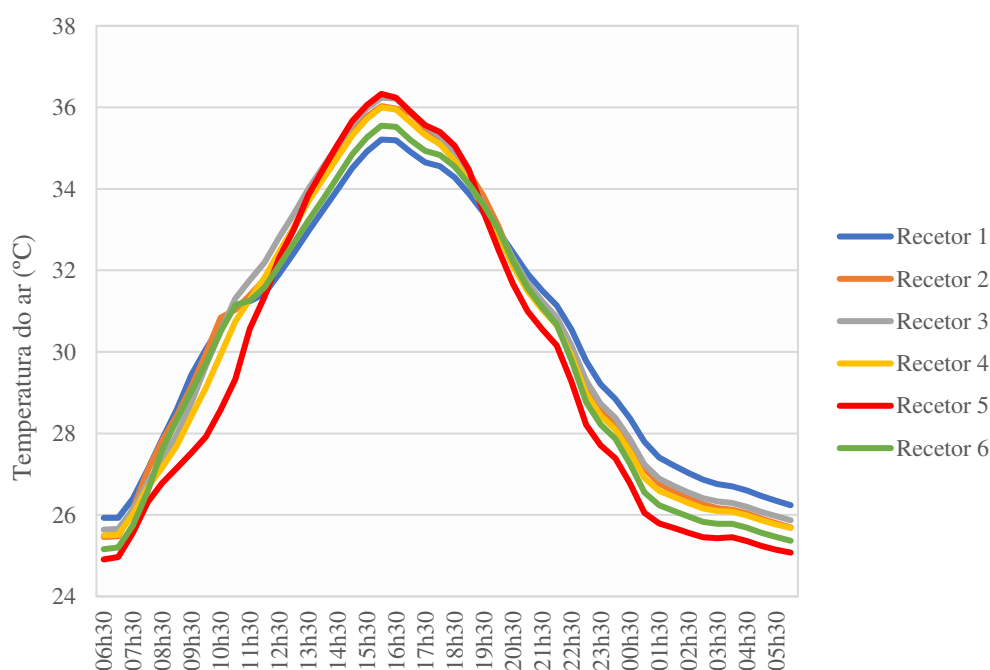


Figura 46 – Temperaturas horárias estimadas com o ENVI-met nos 6 recetores (primavera, dia 18 de junho de 2018)

No que diz respeito ao dia 7 de julho (fig. 47) as temperaturas variaram entre os 18,8°C e os 28,5°C. Tal como no período da primavera no período da manhã as temperaturas registadas no recetor 1 foram as mais elevadas e, a meio do dia, nos recetores 3, 4 e 5, que foram colocados na área do *canyon* urbano com orientação norte/sul. Já no período da tarde foi nestes recetores que se verificaram as temperaturas mais baixas, em comparação com os recetores 1, 2 e 6, que registaram as mais elevadas, que se encontravam instalados em locais onde orientação da rua é este/oeste.

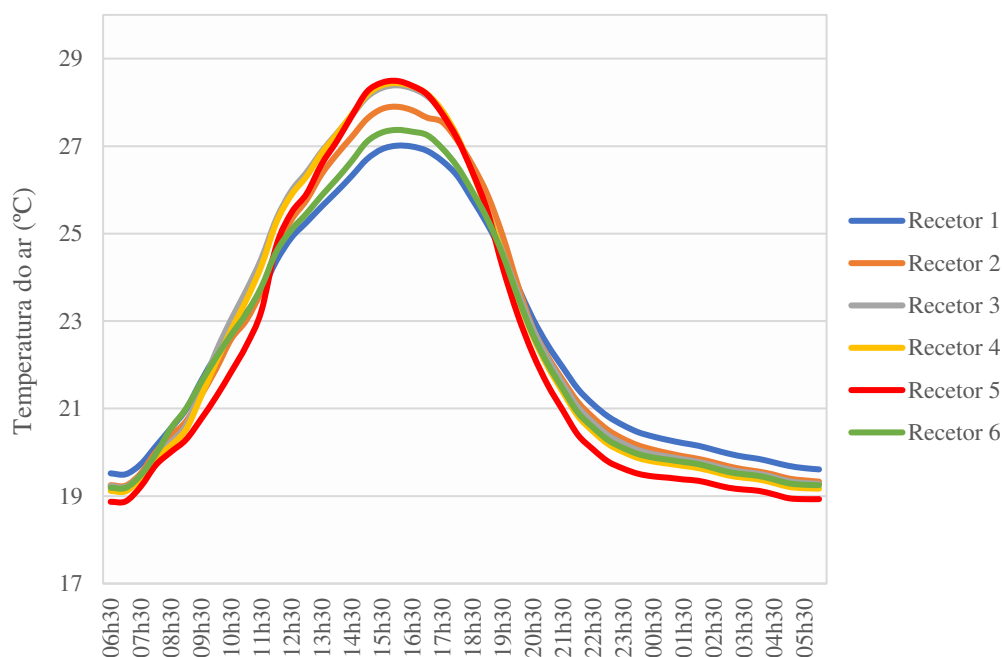


Figura 47 - Temperaturas horárias estimadas com o ENVI-met nos 6 recetores (verão, dia 7 de julho de 2018)

5.4.2. Temperatura das fachadas

Para além da temperatura do ar também a temperatura das fachadas foi modelada no ENVI-met para todos os dias em que foram recolhidas imagens térmicas. Os valores obtidos na modelação tridimensional para fevereiro e junho foram sintetizados no quadro 23.

Quadro 23 - Temperatura média das fachadas modelada no ENVI-met para o dia 21 de fevereiro e para o dia 18 de junho de 2018

Fachadas	Inverno (9h-10h)	Primavera (15h-16h)
Sul	26,2°C	49°C
Norte	12,5°C	44°C
Oeste	12,1°C	43°C
Este	31°C	43,9°C

No dia 21 de fevereiro, em que os termogramas foram recolhidos no período da manhã, a temperatura média das fachadas variou entre os 12,1°C e os 31°C, na fachada oeste e na fachada este, respetivamente. Nas fachadas sul e norte a temperatura média foi de 26,2°C e de 12,5°C.

A 18 de junho, dia em que as imagens térmicas foram recolhidas entre as 15h e as 16h a temperatura média das fachadas variou, segundo a modelação tridimensional, entre os 43,9°C e os 49°C. A temperatura média mais elevada foi registada na fachada oeste e a mais baixa na fachada este.

A temperatura média das quatro fachadas em estudo no dia 7 de julho encontra-se representada no gráfico da figura 48. Neste dia, segundo a modelação tridimensional as temperaturas mais elevadas (53,9°C) foram registadas na fachada oeste, por volta das 18h00 e as

mais baixas na fachada norte. No período da manhã foi na fachada este que se registou as temperaturas mais elevadas e a meio do dia na fachada sul.

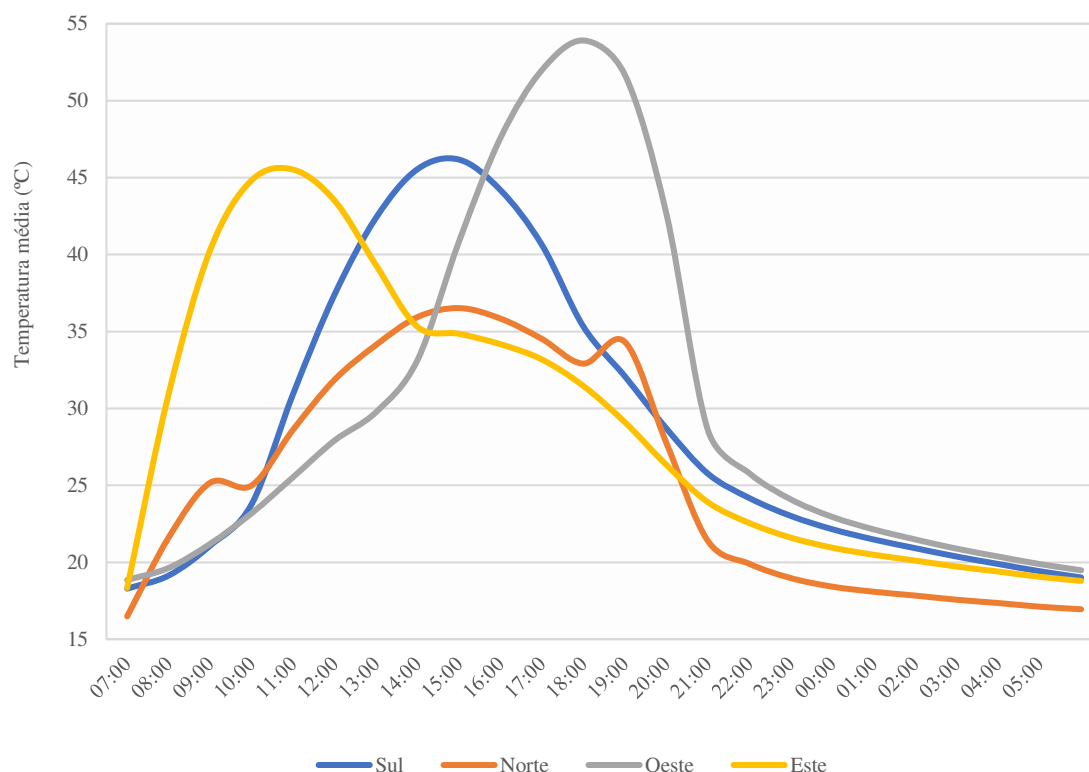


Figura 48 - Temperatura média das fachadas calculada com recurso ao *ENVI-met*

5.4.3. O balanço radiativo das fachadas

Também o balanço radiativo das fachadas foi estimado através do *ENVI-met* para o dia em que foram realizadas as medições no campo. No gráfico da figura 49 apresentam-se os resultados obtidos através da modelação tridimensional no dia 7 de julho durante 24h.

Segundo os resultados obtidos com o modelo 3D, o balanço radiativo destas duas fachadas não terá ultrapassado os 450 W m^{-2} . No período da manhã, tal como seria de esperar, uma vez que se encontrava a receber radiação solar direta, os valores mais elevados foram registados na fachada este. O contrário acontece no período da tarde, sendo nesta fachada que se registam os valores mais baixos, inferiores a 131 W m^{-2} . O valor registado pela fachada oeste, quando apresenta o seu balanço radiativo mais elevado (entre as 17h e as 18h) é ligeiramente superior ao registado na fachada este durante a manhã.

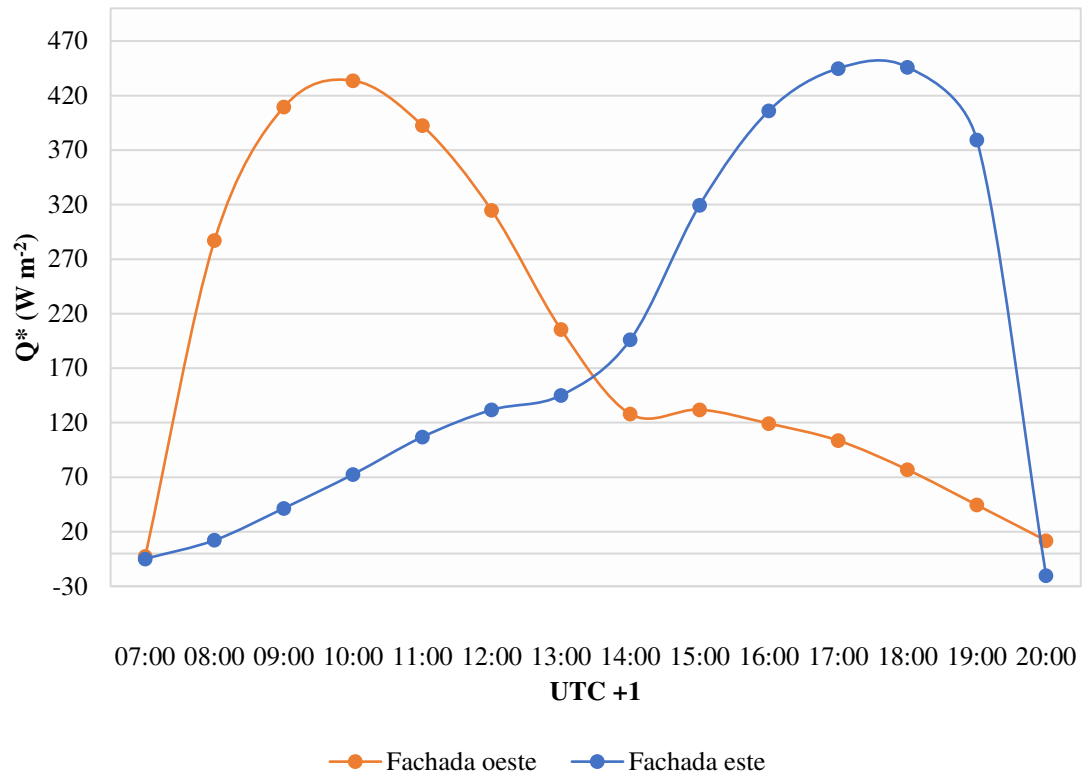


Figura 49 – Q^* das fachadas este e oeste modeladas através do *ENVI-met*

Capítulo VI – Validação dos resultados

6.1. Temperatura do ar

As diferenças encontradas entre os diferentes pares *Hobo/Recetor*, relativamente às temperaturas médias horárias no mês de junho e de julho foram representadas nos gráficos das figuras 50 e 51.

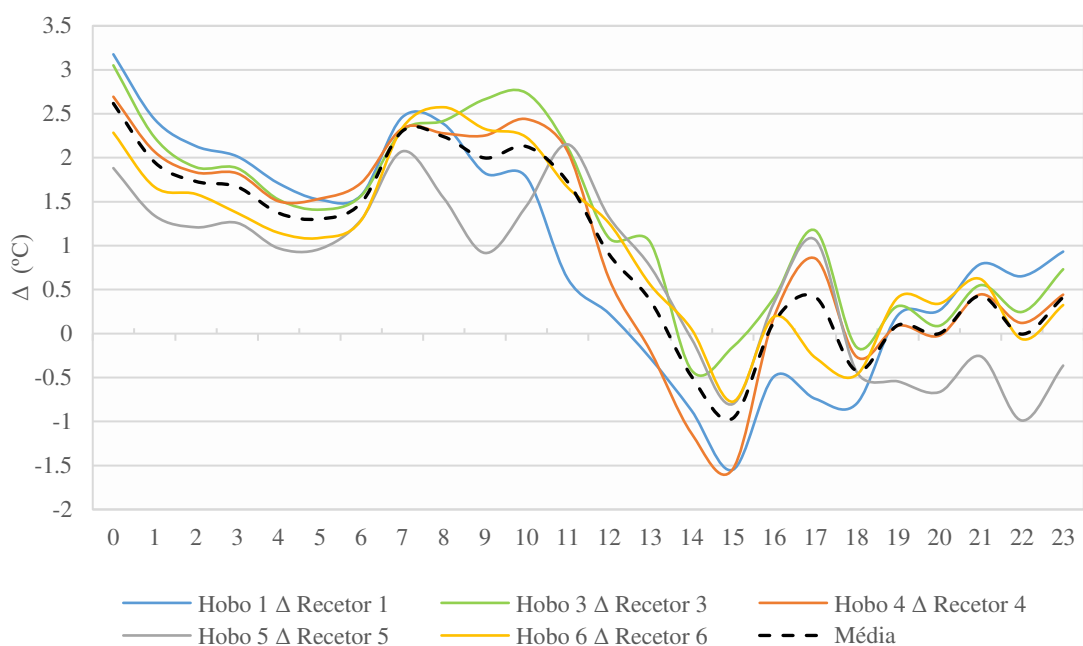


Figura 50 - Diferença entre os valores estimados e os valores observados em campo (temperaturas médias horárias do ar - °C) no mês de junho

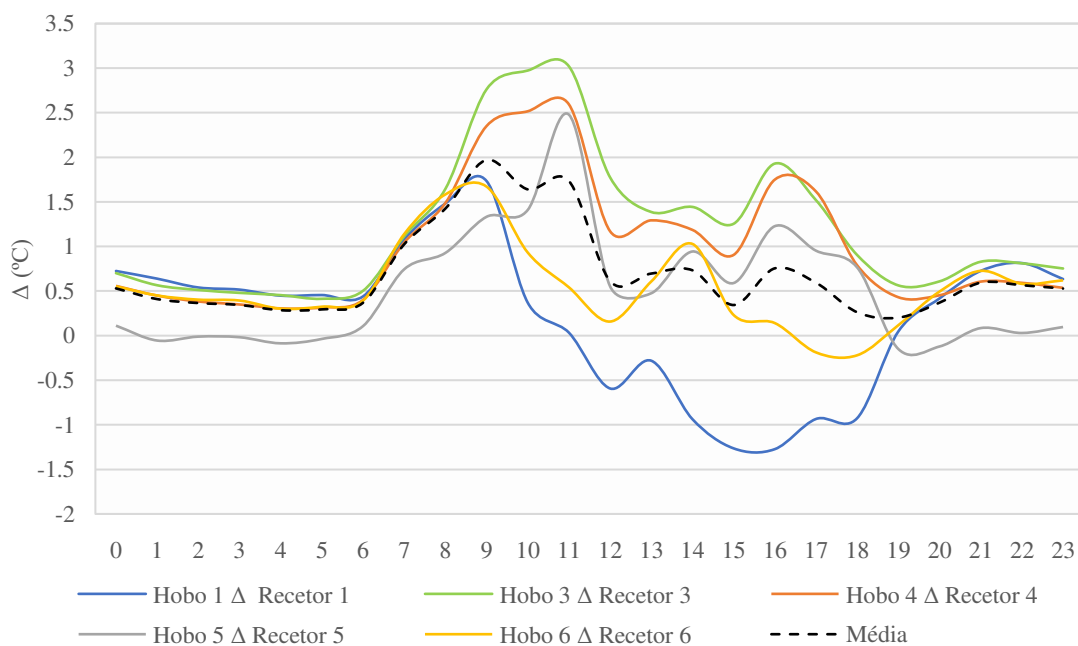


Figura 51 - Diferença entre os valores estimados e os valores observados em campo (temperaturas médias horárias do ar - °C) no mês de julho

As diferenças máximas encontradas entre cada instrumento e o respetivo recetor no mês de junho foram de $+3,2^{\circ}\text{C}$ (entre o *Hobo* 1 e o recetor 1, às 0h) e de mais $3,05^{\circ}\text{C}$ (entre o *Hobo* 3 e o respetivo recetor, às 0h), no mês de julho.

De uma maneira geral os resultados obtidos mostram que no período da manhã o modelo apresenta valores superiores aos observados em campo e no período da tarde valores inferiores aos observados. A análise dos resultados permitiu perceber que as diferenças mais elevadas são registadas nos pares colocados na rua com exposição norte/sul ($\approx 1^{\circ}\text{C}$), em comparação com os valores obtidos para os pares colocados em locais com exposição oposta à direção dominante do vento ($\approx 0,95^{\circ}\text{C}$).

De acordo com as diferenças calculadas entre os valores estimados e os observados a avaliação do modelo permite ver que as diferenças são mais elevadas quando as temperaturas de *input* também o são. Neste caso, no mês de junho, no dia em que foi feito trabalho de campo as temperaturas do ar foram mais elevadas do que as registadas no mês de julho e, por isso, as diferenças calculadas para esse mês são as mais elevadas. Também é preciso registar que nesse mês, as diferenças mais acentuadas se registaram no período da manhã, em todos os pares estudados. Já no mês de julho, as diferenças mais acentuadas foram também positivas mas registaram-se, mais ou menos, a meio da manhã (10h-11h).

Não obstante às diferenças encontradas, os resultados da modelação tridimensional mostram que o modelo faz a modelação desta variável de forma aceitável ao observado no campo não sendo as diferenças encontradas muito significativas relativamente à temperatura do ar.

6.2. Temperatura de superfície das fachadas

Para o dia de inverno, tal como foi observado no campo, segundo a modelação as temperaturas de superfície médias mais elevadas foram registadas nas fachadas sul e este, que já se encontravam a receber radiação solar. No caso das fachadas oeste e norte a temperatura média de superfície destas fachadas estimada pelo modelo foi ligeiramente inferior aos valores registados através da termografia infravermelha.

Na primavera, as temperaturas de superfície das fachadas foram recolhidas no período da tarde, entre as 15h e as 16h. Segundo o modelo, tal como foi observado no campo, a fachada que apresentava temperaturas de superfície mais elevadas a esta hora era a fachada sul. Pelo contrário, a fachada que se encontrava menos aquecida era a fachada oeste, embora neste período se encontrasse a receber radiação solar.

No verão as temperaturas de superfície das fachadas foram recolhidas ao longo do dia. O quadro 24 sintetiza as diferenças encontradas entre as temperaturas estimadas e as observadas em campo com recurso a termografia infravermelha.

Quadro 24 - Diferença entre as temperaturas médias de superfície estimadas pelo modelo e observadas em campo (termografia infravermelha) para cada fachada da área de estudo no verão

		Fachada Sul	Fachada norte	Fachada Oeste	Fachada Este
9h	Termografia	20,4 °C	18,9 °C	22,2 °C	21,7 °C
	Modelo	21,1 °C	25,2 °C	21,2 °C	40,3 °C
	Diferença	0,7 °C	6,3 °C	-1,0 °C	18,6 °C
13h	Termografia	26,0 °C	23,5 °C	24,1 °C	27,4 °C
	Modelo	42,4 °C	34,1 °C	29,8 °C	39,3 °C
	Diferença	16,4 °C	10,6 °C	5,7 °C	11,9 °C
15h	Termografia	31,2 °C	26,5 °C	27,6 °C	27,6 °C
	Modelo	46,2 °C	36,5 °C	40,8 °C	34,8 °C
	Diferença	15,0 °C	10,0 °C	13,2 °C	7,2 °C
19h	Termografia	28,6 °C	27,5 °C	28,6 °C	24,5 °C
	Modelo	32,1 °C	34,3 °C	51,7 °C	29,1 °C
	Diferença	3,5 °C	6,8 °C	23,1 °C	4,6 °C

6.3. Balanço radiativo das fachadas

Relativamente ao balanço radiativo calculado para as fachadas da área de estudo, apresentam-se na figura 52 os valores obtidos no campo e os estimados pelo modelo 3D.

Os resultados obtidos mostram que, no caso da fachada este, ao contrário do que foi registado em campo, o balanço radiativo é mais elevado às 9h do que às 13h, hora em que no campo se registou um balanço radiativo de 825 W m². No caso da fachada oeste os valores estimados pelo *ENVI-met*, no período da manhã (9h-14h), foram sempre superiores aos observados em campo. No período entre as 15h e as 16h, os valores observados em campo foram superiores aos estimados pelo modelo. Às 17h e às 18h, o balanço radiativo foi superior ao observado em campo.

As diferenças calculadas entre os valores estimados e os observados (gráfico da fig. 53) mostram que as mais elevadas foram registadas no período da manhã, para a fachada este e no período da tarde, para a fachada oeste. A diferença mais elevada foi registada às 13h, entre os valores estimados e observados para a fachada este (-619 W m²).

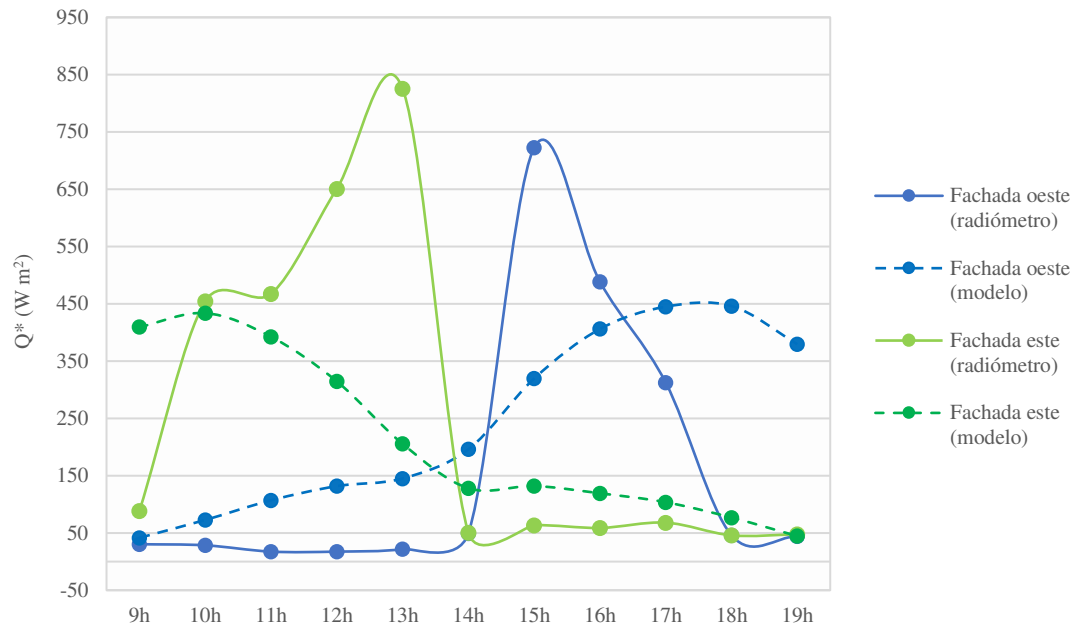


Figura 52 - Valores obtidos com o radiômetro e os estimados pelo modelo 3D relativamente ao balanço radiativo das fachadas

A análise dos resultados obtidos entre os valores estimados e os observados mostra que o modelo apresenta as maiores diferenças durante as horas em que as fachadas se encontram a receber radiação solar: para a fachada oeste, no período da manhã e para a fachada este, no período da tarde. Adicionalmente, a variação do balanço radiativo das fachadas é muito menos acentuada do que a que se registou durante o trabalho de campo.

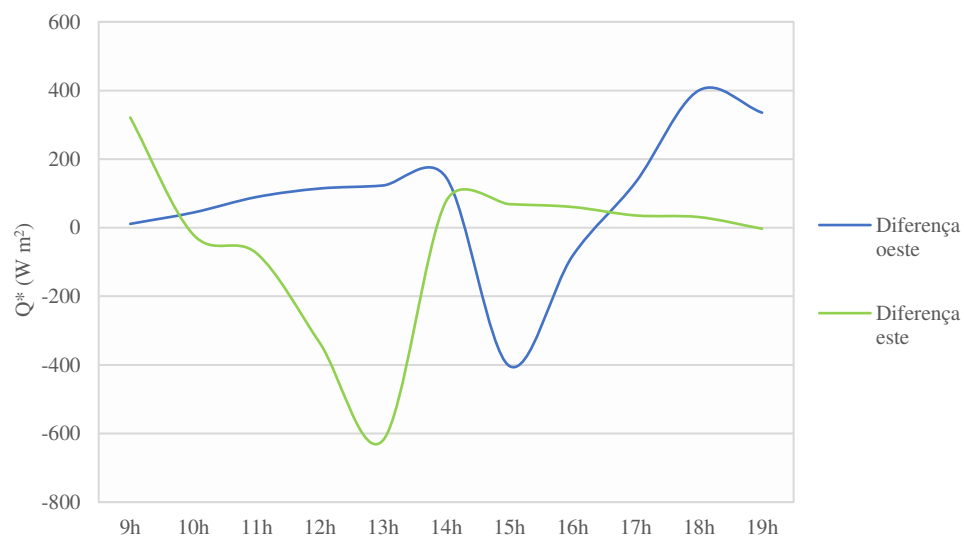


Figura 53 – Diferença entre os valores obtidos em campo e os estimados pelo modelo para o balanço radiativo das fachadas

6.4. Conclusões

Tendo em consideração que a interação entre as formas urbanas e o microclima dos diferentes locais dentro de uma cidade é muito complexa, a influência dos diferentes elementos urbanos nos microclimas pode ser estimada através de modelos de alta resolução em 3D como, por exemplo, o ENVI-met. No entanto, sendo apenas modelos, apresentam limitações que devem ser tidas em consideração.

Acero e Arrizabalaga (2018) compararam a evolução diurna de diferentes variáveis meteorológicas em quatro áreas urbanas diferentes com os resultados estimados pelo *ENVI-met*. Os autores observaram que os resultados para a temperatura do ar e humidade relativa apresentaram uma correlação aceitável entre os valores medidos e os estimados pelo modelo, independentemente das condições meteorológicas regionais.

Relativamente aos resultados do presente trabalho as diferenças encontradas podem ser explicadas pelo facto de o modelo não se ajustar corretamente à radiação solar global registada nos diferentes dias em que foi realizado o trabalho de campo. Tal como referem Acero e Arrizabalaga (2018) o facto de não ser possível ajustar este parâmetro faz com que a sua evolução ao longo do dia não seja representada corretamente pelo modelo. Isto pode influenciar, não só a temperatura do ar estimada pelo modelo mas, também, a temperatura das diferentes superfícies urbanas e das fachadas.

Embora não seja possível ajustar este parâmetro através do *input* dos seus valores horários, é possível colocar um fator de ajustamento no modelo, que permite que esta variável se ajuste, de certa forma, aos valores conhecidos da radiação solar incidente. No entanto, no presente trabalho, mesmo com diferentes fatores de ajustamento para esta variável, utilizando como referência os valores registados na estação meteorológica do IGOT, o modelo apresentava grandes diferenças.

Contudo, os resultados obtidos mostram que, mesmo existindo algumas diferenças entre os valores observados no campo e os estimados nas diferentes simulações, o modelo demonstrou conseguir simular de forma aceitável o comportamento e a variação diurna das diferentes variáveis discutidas anteriormente. Tal como no trabalho de Acero e Arrizabalaga (2018) a temperatura do ar foi a variável que apresentou as diferenças mais baixas entre os valores estimados e os observados, sendo por isso considerado aceitável.

Capítulo VII – Discussão de resultados

7.1. Temperaturas de superfície (Ts) com imagens de satélite

As temperaturas de superfície são muitas vezes usadas, de forma errada, como indicador da ocorrência do fenómeno da Ilha Urbana de Calor. Segundo Lopes (2003), que cita Parlow (1998), a temperatura de superfície é erradamente utilizada como indicador da ilha urbana de calor. Porém, não há correspondência direta entre as duas, uma vez que a temperatura do ar é resultado da interação entre os termos do balanço energético e, portanto, da energia que está disponível para promover o aquecimento da atmosfera.

Esta relação não é correta, uma vez que as temperaturas do ar são medidas, normalmente, a 2 metros do solo e correspondem à temperatura das parcelas de ar junto ao solo. Pelo contrário as temperaturas de superfície, habitualmente obtidas através de imagens de satélite, traduzem o potencial aquecimento da atmosfera urbana e estão dependentes da emissividade das superfícies.

Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que as temperaturas de superfície mais baixas podem ser associadas aos locais ocupados por espaços verdes e as mais elevadas aos espaços ocupados pelo edificado, nos períodos da primavera e do verão. O comportamento da temperatura de superfície pode ser explicado pela conhecida influência dos espaços verdes na diminuição das temperaturas, uma vez que são áreas com maior vigor de biomassa. O mesmo não acontece nas áreas edificadas, construídas com materiais urbanos de fraco albedo, que aquecem muito mais rapidamente do que as áreas ocupadas por vegetação e que retêm grande parte da energia recebida, libertando-a posteriormente, contribuindo para o aquecimento da atmosfera urbana.

Ao contrário do que seria de esperar (de acordo com os resultados obtidos noutras cidades) não é no centro do concelho de Lisboa que se registam as temperaturas de superfície mais elevadas, embora sejam locais densamente edificados. Pelo contrário, é nas áreas limítrofes, como as freguesias do Lumiar, Carnide, Olivais e Santa Clara (no norte da cidade) mas também Marvila (no oriente) onde se encontram as superfícies mais aquecidas à hora da passagem do satélite na área de Lisboa. Em locais como o aeroporto isto pode ser explicado pelo facto de as imagens de satélite utilizadas serem referentes apenas ao período da manhã (11:00 UTC), altura em que as superfícies desocupadas recebem mais radiação aquecendo muito mais rapidamente do que outras áreas.

Através da análise das temperaturas de superfície é possível notar uma clara diferenciação entre a metade norte e a metade sul da cidade. Esta diferença demonstra nitidamente a influência da proximidade ao Tejo, contribuindo para temperaturas de superfície mais baixas nas áreas

ribeirinhas. No período de verão este efeito é mais visível na parte sudoeste da cidade. No outono a influência do Tejo faz-se sentir em todas as freguesias ribeirinhas, em especial, em Belém e Parque das Nações.

À semelhança do que acontece em toda a cidade de Lisboa as T_s calculadas para o Lumiar mostram que a vegetação tem uma grande influência nos valores registados. As temperaturas mais baixas registam-se quase sempre nos locais ocupados por espaços verdes. Analisando a qualquer uma das escalas é visível que o efeito da vegetação é mais notório nos períodos da primavera e do verão, onde as temperaturas da envolvente são mais elevadas do que as registadas nestas áreas.

Tendo em consideração as limitações apresentadas pelo uso deste tipo de imagens para estimar as temperaturas de superfície, a análise à escala da área de pormenor não é indicada. No entanto, os resultados obtidos mostram que, exceto no inverno, na área de pormenor, à hora da passagem do satélite, salvo no inverno, as temperaturas de superfície são já superiores a 29°C e, portanto, também aqui há um potencial aquecimento da atmosfera.

No entanto, é necessário realçar que a resolução das imagens de satélite utilizadas não é a mais indicada para um estudo à microescala e, por isso, as medições feitas à microescala revestiram-se de uma importância ainda maior para o conhecimento da temperatura das diferentes superfícies urbanas na área de estudo.

Para além das limitações enunciadas anteriormente, é necessário salientar ainda que, pelo facto de as imagens de satélite utilizadas serem apenas referentes ao período da manhã, os resultados obtidos tornam-se insuficientes para um conhecimento adequado do comportamento das temperaturas de superfície, no período diário e, de certa forma, do verdadeiro aquecimento da atmosfera na área em estudo.

Tendo em consideração as limitações encontradas no cálculo das temperaturas de superfície através de imagens de satélite foram utilizadas diferentes metodologias para o conhecimento de diferentes variáveis à microescala no *canyon* urbano em estudo.

7.2. Temperatura do ar no *canyon* urbano

A monitorização das temperaturas do ar à microescala, com recurso à instalação de uma rede microclimática na área de estudo, revelou-se fundamental para perceber a variação diurna da temperatura e da humidade relativa do ar na área de estudo, sobretudo nas áreas com exposições diferentes.

Durante os meses de abril, maio, junho e julho, as temperaturas do ar apresentaram uma variação diurna e noturna semelhante, tanto no período da manhã como no da tarde. No entanto,

é necessário lembrar que este ano foi particularmente atípico relativamente aos valores de temperatura e humidade relativa registados na região de Lisboa, por ter sido um inverno e primaveras bastantes chuvosos. Relativamente aos dados obtidos em cada instrumento a localização de cada *Hobo* permitiu compreender que as temperaturas do ar foram mais elevadas junto à fachada sul (*Hobo* 1) ao longo dos meses em estudo. Este instrumento e o *Hobo* 2 traduziram o comportamento da área com orientação este/oeste: embora ambos tenham sido colocados nesta área, os valores registados no *Hobo* 1 parecem traduzir melhor o comportamento das temperaturas em áreas que não se encontram expostas à direção dominante do vento em Lisboa (norte/sul). Apesar do *Hobo* 2 se encontrar numa área com orientação este/oeste, apresentou temperaturas muito semelhantes às verificadas nos *Hobos* colocados ao longo da área com exposição norte/sul, muito provavelmente, por sofrer ainda influência da ventilação na direção predominante.

Os *Hobos* 3, 4, 5 e 6, que se encontravam colocados ao longo da área do *canyon* urbano com orientação norte/sul, apresentaram valores semelhantes ao longo do tempo. No entanto, o *Hobo* 5, que se encontrava mais a norte, registou sempre as temperaturas mais elevadas. Isto pode ser explicado pelo facto de, dos três instrumentos colocados na rua com orientação norte/sul, este (*Hobo* 5) se encontrar instalado mais próximo da fachada oeste do que os outros dois, que se encontravam no centro do *canyon*.

Nos gráficos da figura 54, apresentam-se as médias horárias das temperaturas do ar dos instrumentos localizados na rua com orientação este/oeste e norte/sul, que mostram as diferenças encontradas para os locais do *canyon* urbano com diferentes orientações.

Os instrumentos colocados na rua com exposição este/oeste apresentaram sempre temperaturas médias horárias mais elevadas do que os que foram instalados na rua com exposição norte/sul. As diferenças mais elevadas foram registadas, em todos os meses do estudo, entre as 9h e as 19h, quando o *canyon* urbano se encontra a receber radiação solar direta.

A instalação desta rede microclimática permitiu perceber que áreas com exposições opostas à direção do vento predominante, apresentam, tal como seria de esperar, temperaturas do ar relativamente superiores às registadas em locais cuja exposição é concordante com essa direção. Em particular neste *canyon* urbano, verificou-se que na área com exposição norte/sul, os locais a norte apresentam temperaturas mais elevadas do que as registadas a sul.

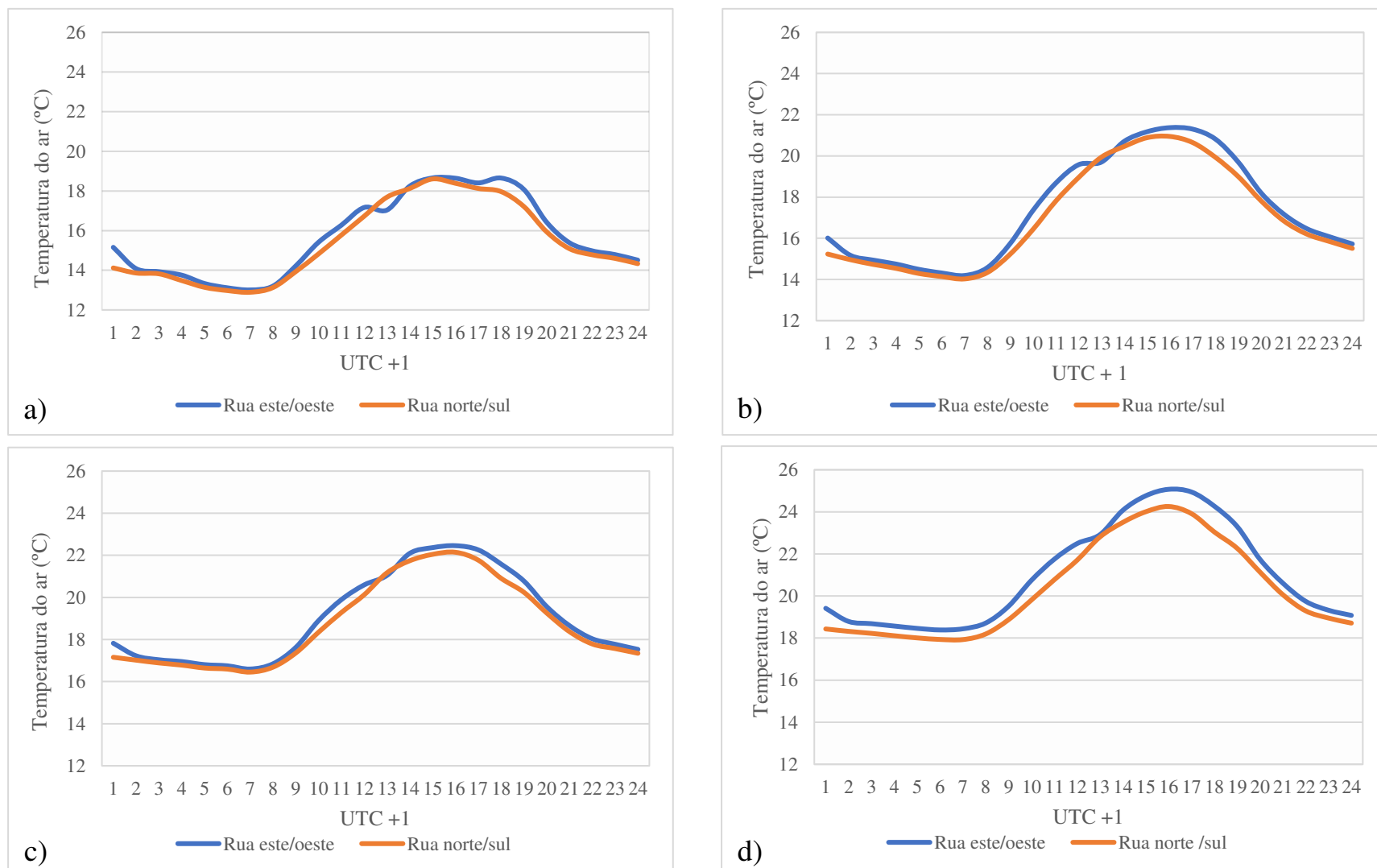


Figura 54 – Médias horárias das temperaturas do ar (°C) nas duas áreas do canyon urbano com exposições opostas em abril (a), maio (b), junho (c) e julho (d)

7.3. Termografia infravermelha: as temperaturas das fachadas e outras superfícies

O uso da termografia infravermelha em meio urbano revelou-se fundamental na compreensão do comportamento térmico das diferentes superfícies urbanas e fachadas da área de estudo.

A paleta de cores das fachadas existentes no *canyon* urbano de Telheiras não é muito diversificada e, por isso, as temperaturas mais baixas foram, quase sempre, registadas nos locais onde as fachadas se encontram pintadas de branco (cor que apresenta um albedo entre os 0,5 e 0,9) e as mais elevadas onde as cores são o rosa (0,3 a 0,4) e o cinzento (0,2 a 0,3), independentemente da sua exposição.

Relativamente à influência da exposição das fachadas, as que estão expostas a sul apresentaram sempre, tanto no período manhã como no da tarde, as temperaturas mais elevadas das quatro fachadas em estudo. No inverno (de manhã) esta fachada apresentou temperaturas, em relação à fachada com exposição oposta, em média, superiores em 6°C. O mesmo aconteceu na primavera (no período da tarde) em que esta fachada se apresentava mais aquecida do que a fachada norte, em média, 4°C. No verão, durante todo o dia de trabalho de campo, a fachada sul esteve mais quente que a norte mesmo quando esta última já se encontrava a receber radiação solar direta.

No que diz respeito às fachadas este e a oeste, a que se encontra exposta a este apresentou, no inverno, temperaturas superiores (em média, 3°C) em comparação com a fachada oeste. Já no período da primavera (durante a tarde) a fachada oeste apresentou temperaturas superiores (em média, 4°C) mesmo quando já não se encontrava a receber radiação solar. No verão, a fachada este apresentou as temperaturas mais elevadas perto da hora de maior elevação do sol, enquanto que a fachada oeste registou as temperaturas mais elevadas às 15h quando já estava a receber radiação solar.

Os resultados obtidos mostram que a temperatura das fachadas responde, quase sempre, de forma direta, à incidência de radiação solar. No entanto, tal como ficou demonstrado, por vezes, as temperaturas máximas registadas nestas fachadas, não foram registadas sob condições de incidência de radiação solar. Isto mostra que, mesmo apenas a receber radiação solar difusa os materiais utilizados em meio urbano, têm respostas térmicas importantes que podem contribuir para o aquecimento urbano.

É também preciso chamar a atenção para o facto de, embora não tenham sido considerados neste trabalho, existirem neste *canyon* urbano, diferentes tipos de materiais que apresentam comportamentos térmicos distintos e nos quais se registaram temperaturas muito

elevadas. São exemplo disso o ferro (usado, neste caso, nas varandas dos diferentes edifícios), o plástico que compõe os estores que protegem os apartamentos da radiação solar, e também os diferentes tipos de vidros usados, por exemplo, nos terraços do primeiro piso, que apresentavam sempre temperaturas elevadas, e que, posteriormente, contribuem para o aquecimento da atmosfera urbana.

Os três tipos de materiais utilizados na superfície horizontal (asfalto) apresentaram comportamentos térmicos distintos ao longo do dia de trabalho de campo. O material que apresentou as temperaturas mais elevadas foi o asfalto, por apresentar um fraco albedo, entre os 0,05 e 0,2 (Santamouris, 2006). Este tipo de material ocupa grande parte da superfície da área do *canyon* urbano, nomeadamente a rua, mas também o local onde os veículos estacionam e apresenta elevadas temperaturas, mesmo no período da manhã (com temperaturas médias de 28,4°C, às 9h e de 47,6°C, às 13h). No entanto, no período da tarde, quando já não há radiação solar incidente este tipo de material apresenta também temperaturas de superfície elevadas.

Tal como foi observado neste trabalho, Villena Del Carpio *et al.* (2016) observaram, que as temperaturas de superfície dos materiais utilizados nas superfícies urbanas são mais baixas no período da manhã. No entanto, referem que a absorção da radiação solar não se traduz imediatamente num aumento das temperaturas das superfícies e, por isso, observaram que as temperaturas de superfície mais elevadas não se registam às 12h mas sim às 13h, quando a radiação solar incidente começa a diminuir e os materiais começam a libertar o calor acumulado para o ambiente.

Assim como no trabalho destes autores, observou-se no presente estudo que as temperaturas de superfície respondem, quase sempre, à radiação solar incidente. Porém, mesmo quando não se encontram a receber radiação solar direta materiais como o asfalto apresentam temperaturas de superfície muito elevadas.

No entanto, não é apenas em materiais com albedo muito fraco que se registam temperaturas elevadas. No caso da calçada, cujo albedo varia normalmente entre os 0,3 e os 0,4 (Santamouris, 2006), as temperaturas máximas observadas variaram entre os 55°C e os 57°C. No caso do pavimento em azulejo a temperatura mais elevada registada foi de 42,1°C. O mesmo foi observado por Villena Del Carpio *et al.* (2016) que referem que as temperaturas registadas nos diferentes tipos de materiais estão diretamente relacionadas com a refletância solar dos mesmos (correlação com um $R^2 \geq 0,95$). Segundo os autores, as superfícies mais refletivas, como a calçada portuguesa, apresentaram as temperaturas mais baixas em comparação com materiais como o asfalto que apresentou as temperaturas mais elevadas. O mesmo verificou-se no presente trabalho relativamente às temperaturas de superfície da calçada portuguesa.

A importância de se conhecer e compreender as respostas térmicas dos diferentes materiais urbanos utilizados, quer nas fachadas quer nas superfícies, passa pelo facto de o tipo de materiais utilizados nas áreas urbanas não ser muito diversificado. As estradas são normalmente construídas com recurso ao asfalto ou ao cimento, que apresentam grande capacidade de absorção e baixa capacidade refletora. Isto leva a que grande parte das áreas urbanas, durante o dia se encontre a acumular energia, posteriormente, libertada para a atmosfera, contribuindo para o seu aquecimento. No caso dos materiais e cores utilizadas nas fachadas importa compreender que nas superfícies verticais, devido às múltiplas reflexões que ocorrem nos *canyons* urbanos, há maior facilidade em que estes materiais absorvam a energia libertando-a depois para a atmosfera, sobretudo no período noturno quando o balanço radiativo é negativo.

7.4. O balanço radiativo das fachadas e superfícies do *canyon* urbano

O balanço radiativo de uma determinada superfície mostra se esta superfície se encontra a ganhar ou a perder energia, ou seja, se se encontra a armazenar ou a libertar calor para a atmosfera. Segundo (Oke, 2002) o balanço radiativo de uma superfície é positivo quando representa um ganho para esta (durante o dia, porque há incidência de radiação solar) e negativo quando representa uma perda (durante a noite).

Relativamente às fachadas e à área de estudo cujos valores do balanço radiativo foram recolhidos de hora em hora, observou-se que o balanço destas superfícies responde diretamente à incidência da radiação solar, uma vez que, por exemplo, a fachada este, que se encontra a receber radiação solar durante o período da manhã, apresenta nesse mesmo período valores do balanço de radiação mais elevados do que a fachada oeste. O contrário acontece no período da tarde. No caso das fachadas norte e sul, a fachada sul apresentou um balanço radiativo superior ao da fachada norte ($+73 \text{ W m}^{-2}$). Isto pode ser explicado pelo facto de esta fachada se encontrar a receber radiação solar há mais tempo.

Para além disso, o balanço radiativo da área de estudo traduz a resposta térmica do *canyon* urbano à incidência de radiação solar. É apenas a partir das 11h da manhã, altura em que todo o *canyon* está a receber radiação solar (exceto as superfícies que se encontram à sombra) que o balanço radiativo desta área apresenta um grande aumento nos valores registados (227 W m^{-2} , às 11h e 826 W m^{-2} às 12h). Na hora de maior elevação do sol (onde a incidência de radiação solar é máxima) os valores atingidos foram muito superiores.

No que diz respeito à relação entre o balanço radiativo das diferentes superfícies e as temperaturas do ar registadas no *canyon* urbano, verificou-se que as temperaturas mais elevadas na rua com orientação norte/sul (em que foi calculado o balanço radiativo dessas fachadas de hora em hora) são mais elevadas entre as 14h e as 16h, altura em que o balanço radiativo da fachada

este varia entre os $50,4 \text{ W m}^{-2}$ e os $58,8 \text{ W m}^{-2}$ e da fachada oeste entre os $49,5 \text{ W m}^{-2}$ e os $722,6 \text{ W m}^{-2}$. No caso da área de estudo, é nestas horas que o balanço radiativo calculado é mais elevado, variando entre os 876 W m^{-2} (14h) e os 756 W m^{-2} (16h), constatando-se assim que nas horas em que o balanço radiativo é mais elevado as temperaturas do ar também o são.

Analisando as horas do dia em que o balanço radiativo é mais elevado em cada tipo de material e nas diferentes fachadas, os resultados obtidos mostram que no asfalto as temperaturas mais elevadas foram registadas quando o balanço radiativo deste tipo de material é também mais elevado (15h). O mesmo se verificou no caso da calçada, que apresentou as temperaturas mais elevadas e o balanço radiativo mais elevado às 13h.

À semelhança da importância ligada com o conhecimento das temperaturas de superfície dos materiais urbanos, o balanço radiativo das diferentes superfícies deste *canyon* urbano, permitiu compreender que diferentes materiais, têm diferentes respostas radiativas que devem ser consideradas.

Capítulo VIII - Conclusões

Independentemente da sua dimensão, as áreas urbanas apresentam normalmente características particulares e bastantes complexas em relação ao ambiente que as rodeia, sendo cada vez mais compactas e com edifícios altos, que nem sempre são pensados e organizados no território tendo em consideração as consequências que podem provocar no clima das cidades. Num contexto de alterações climáticas, importa perceber de que forma as decisões tomadas no contexto do planeamento urbano influenciam os seus climas, contribuindo para a alteração dos padrões térmicos das cidades e muitas vezes agravar o já amplamente anunciado efeito das alterações climáticas urbanas.

Os objetivos a que me propus atingir neste trabalho procuraram responder à necessidade de conhecimento dos mecanismos do balanço radiativo de diferentes superfícies (horizontais e verticais) num bairro de Telheiras, no norte de Lisboa e compreender de que forma influenciam as temperaturas do ar no *canyon* urbano. Dado que as medições no campo são pontuais, pretendia-se testar igualmente um modelo micrometeorológico tridimensional (*ENVI-met*) para validar e estender o conhecimento dessas interações à totalidade da superfície de massa edificada na área de estudo.

Os resultados obtidos com as imagens de satélite mostram que as temperaturas de superfície mais baixas podem ser associadas aos locais ocupados por espaços verdes e as mais elevadas aos espaços ocupados pelo edificado, nos períodos da primavera e do verão. À semelhança do que acontece em toda a cidade de Lisboa, no Lumiar, os locais ocupados por vegetação apresentam as T_s mais baixas. Analisando a qualquer uma das escalas é visível que o efeito da vegetação é mais notório nos períodos da primavera e do verão, onde as temperaturas da envolvente são mais elevadas do que as registadas nestas áreas.

No que diz respeito ao balanço radiativo (Q^*) das superfícies do *canyon* urbano, os resultados obtidos mostram que todas as superfícies respondem sobretudo à quantidade de radiação solar incidente. Nos dias em que se efetuou trabalho de campo (a 21 de fevereiro, a 18 de junho e a 7 de julho), observou-se que as fachadas expostas a este e a oeste apresentaram o seguinte comportamento:

Durante a manhã a fachada este apresenta os valores mais elevados, atingindo o máximo às 13:00h ($\approx 825 \text{ W m}^{-2}$). Durante a tarde, os valores mais elevados foram registados na fachada oeste, com um máximo de $\approx 722 \text{ W m}^{-2}$, às 15:00h.

Nas fachadas expostas a norte e a sul o comportamento radiativo foi o seguinte: à hora de máxima elevação do sol, a fachada sul apresenta um balanço radiativo mais elevado do que a fachada norte, respetivamente $\approx 632 \text{ W m}^{-2}$ e $\approx 559 \text{ W m}^{-2}$.

Relativamente à temperatura das diferentes superfícies do *canyon* urbano, a fachada sul apresenta sempre temperaturas mais elevadas do que a fachada norte, registando-se as maiores diferenças às 15:00h (4,7°C). No caso das fachadas este e oeste, a fachada exposta a oriente apenas apresenta temperaturas mais elevadas do que a fachada oeste às 13:00h. Tanto no período da manhã como no da tarde, a fachada oeste apresenta valores mais elevados (em média, de +2,3°C).

Dos 3 tipos de superfícies planas estudadas, o asfalto apresenta valores de Q^* mais elevados (136,2 W m^{-2} , às 9h00, 873 W m^{-2} , às 13h00 e 191,9 W m^{-2} , às 19h00) do que a calçada portuguesa de cor clara (105,9 W m^{-2} , às 9h00, 724,8 W m^{-2} , às 13h00 e 191,9 W m^{-2} , às 19h00) ou o pavimento, apresentando às 13:00h, um Q^* superior ao da calçada em 149 W m^{-2} . No entanto, à mesma hora, quando comparado com o Q^* registado no pavimento esta diferença foi de -14 W m^{-2} .

De entre os 3 tipos de materiais utilizados nas superfícies horizontais, o asfalto apresenta sempre temperaturas mais elevadas do que a calçada portuguesa (+9,4°C), sendo as maiores diferenças registadas às 15:00h. Em relação ao pavimento, o asfalto apresenta temperaturas mais elevadas, em média de + 12,9°C, durante todo o dia, à exceção das 19h, em que apresenta temperaturas mais baixas, em média, 1°C.

Com este trabalho ficou demonstrado que a utilização de uma rede microclimática para a monitorização da temperatura do ar é fundamental para o conhecimento do seu comportamento à microescala. Os resultados obtidos permitiram concluir que no *canyon* urbano em estudo a temperatura do ar é mais elevada na área com exposição norte/sul, do que na área com exposição este/oeste. Estas diferenças, que nunca ultrapassam 1,2°C, são mais evidentes no período da tarde, entre as 15:00h e as 20:00h.

Relativamente às diferenças encontradas entre os valores estimados e os observados da temperatura do ar, o modelo apresenta sempre diferenças mais elevadas quando as temperaturas de *input* também o são, sobretudo durante a manhã (diferenças máximas de $\approx 3^\circ\text{C}$). Durante a tarde as diferenças máximas são 1,5°C.

No que diz respeito às temperaturas das fachadas estimada pelo *ENVI-met*, as diferenças encontradas são bastante consideráveis. Em alguns casos, os valores estimados pelo modelo são superiores em 18°C (na fachada este, às 9:00h), relativamente ao observado em campo e em 23°C, no caso da fachada oeste, às 19:00h. Em relação às diferenças encontradas para o Q^* das fachadas,

embora o modelo apresente uma variação diurna deste balanço semelhante ao que foi observado em campo, as diferenças encontradas são, no caso da fachada este de -619 W m^{-2} , às 13:00h e -403 W m^{-2} , no caso da fachada oeste, às 15:00h. Desta forma, a modelação tridimensional mostrou ser uma ferramenta de complemento ao trabalho de campo relativamente aceitável, mas o software utilizado deve ser objeto de mais trabalho de validação.

Numa perspetiva futura seria interessante dar continuação ao presente estudo. Tendo em consideração as limitações apresentadas, em futuras investigações seria importante incluir outras componentes urbanas que também influenciam o clima urbano. Uma destas componentes são os veículos automóveis, que não foram consideradas no presente trabalho. Para além disso, numa perspetiva futura a inclusão no estudo de outro tipo de materiais pode ser importante. Tal como se referiu anteriormente, existem muitos outros materiais utilizados em meio urbano, cujo comportamento e resposta térmica é diferente dos materiais estudados na presente dissertação. Ainda, a realização de um estudo semelhante em dois *canyons* urbanos diferentes, permitira ter um conhecimento mais abrangente do comportamento térmico dos materiais sob condições distintas.

Em conclusão, sendo este um dos primeiros estudos que aborda este tema na perspetiva da Climatologia Urbana muitas foram as limitações encontradas. No entanto, trata-se de um trabalho com um cariz totalmente inovador em Portugal, sendo, por isso, necessário prosseguir a investigação noutras áreas de estudo e período do ano, de modo a encontrar soluções de materiais que possam ajudar a mitigar o efeito de ilha urbana de calor nas cidades.

Referências bibliográficas

- Acero, J. A., & Arrizabalaga, J. (2018). Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1–2), 455–469. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1971-y>
- Adam, M., Ng, E. Y. K., Hong, J., Heng, M. L., Tong, J. W. K., & Acharya, U. R. (2017). Computer aided diagnosis of diabetic foot using infrared thermography: A review. *Computers in Biology and Medicine*, 91(August), 326–336. <https://doi.org/10.1016/J.COMPBIOMED.2017.10.030>
- Al-Habaibeh, A., Anderson, G., Damji, K., Jones, G., & Lam, K. (2010). Using Infrared Thermography for Monitoring Thermal Efficiency of Buildings - Case Studies From Nottingham Trent University, (The 7th Jordanian International Mechanical Engineering Conference (JIMEC'7) 27-29 September 2010, Amman – Jordan).
- Alcoforado, M., Andrade, H., & Oliveira, S. (2008). Clima Urbano e mudanças climáticas: Impactes e adap. in M. Alcoforado, H. Andrade, A. Lopes, & S. Oliveira (Eds.), *Estudos sobre cidades e alterações climáticas*. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos.
- Alcoforado, M. J. (1993). *O Clima da Região de Lisboa. Contrastes e Riscos Térmicos*. (1ª ed.). Lisboa: Centro de Estudos Geográficos.
- Alcoforado, M. J. (2010). *Climatologia Urbana para o Ensino*. Lisboa: Núcleo CliMA, Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa.
- Alcoforado, M. J., & Andrade, H. (2006). Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): Main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1–3), 151–159. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0152-1>
- Alcoforado, M. J., Andrade, H., & Lopes, A. (2010). Clima e ordenamento urbano na escala microclimática: o exemplo do bairro de Telheiras em Lisboa. Em E. Figueiredo (Ed.), *Clima e Recursos Naturais* (Vol. 2, pp. 43–82). Bragança.
- Alcoforado, M. J., Andrade, H., Lopes, A., & Vasconcelos, J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning. The example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning*, 90(1–2), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.006>
- Alcoforado, M. J., Andrade, H., Oliveira, S., Festas, M. J., & Rosa, F. (2009). *Alterações climáticas e desenvolvimento urbano*. Lisboa: Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano Campo.
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Alves, E., & Canário, P. (2014). Lisbon Heat Island. Statistical Study (2004-2014). *Finisterra*, 98, 61–80.
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Andrade, H., & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa*. Lisboa.
- Andrade, H. (2003). *Bioclima humano e temperatura do ar em Lisboa*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.

- Andrade, H. (2005). O Clima Urbano - Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra*, 40(80), 67–91.
- Avdelidis, N. P., & Moropoulou, A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35(7), 663–667. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00210-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00210-4)
- Barreira, E. (2004). *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrométrico dos Edifícios*. Tese de Mestrado em Construção de Edifício da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Barsi, J., Barker, J., & Schott, J. (2003). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2003*, 2–4. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294665>
- Barsi, J., Schott, J., Palluconi, F., & Hook, S. (2005). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. in J. J. Butler (Ed.) (Vol. 5882, p. 7). <https://doi.org/10.1117/12.619990>
- Bridgman, H. A., & Oliver, J. E. (2006). *The global climate system: Patterns, processes, and teleconnections. The Global Climate System: Patterns, Processes, and Teleconnections*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817984>
- Chui, A. C., Gittelsohn, A., Sebastian, E., Stamler, N., & Gaffin, S. R. (2018). Urban heat islands and cooler infrastructure – Measuring near-surface temperatures with hand-held infrared cameras. *Urban Climate*, 24: 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.009>
- Daglish, J., le Jeune, S. S., Pypendop, B. H., Ramirez, E. M., & Turner, T. A. (2017). Use of Infrared Thermography to Detect Jugular Venipuncture in the Horse. *Journal of Equine Veterinary Science*, 59, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2017.09.003>
- Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2):231–249. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.005>
- FLIR. (2010). *User's manual. FLIR T4xx series* (No. T55959).
- Ganho, N. (1999). Clima urbano e a climatologia urbana: fundamentos e aplicação ao ordenamento urbano. Em *Cadernos de Geografia*: 97–127.
- Garcia, J. R. R. (2014). *Potencialidades da Termografia para o Diagnóstico de Patologias em Edifícios*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *International Journal of Environment and Pollution*, 5. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021817>
- Holst, G. C. (2000). *Common sense approach to thermal imaging. Optical Engineering Press*. Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate - a preview on ENVI-MET 4.0. *The seventh International Conference on Urban Climate*, (July): 1–4.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416>
- Joaquim, F. G. (2011). *Efeito Ilha de Calor na cidade de Lisboa – Proposta de medidas de mitigação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Leandro, A. M. (2011). *Avaliação da Capacidade de Instalação de Telhados Verdes na Cidade de Lisboa com Recurso a SIG e Detecção Remota*. Tese de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Lee, S., Moon, H., Choi, Y., & Yoon, D. (2018). Analyzing Thermal Characteristics of Urban Streets Using a Thermal Imaging Camera : a Case Study on Commercial Streets in Seoul. <https://doi.org/10.3390/su10020519>
- Lopes, A. (2003). *Modificações no Clima de Lisboa Como Consequência do Crescimento Urbano. Vento, Ilha de Calor de Superfície e Balanço Energético*. Tese de Doutoramento da Universidade de Lisboa.
- Lopes, A. (2006). O sobreaquecimento das cidades. Causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa. *Territorium*, (15), 39–52. <https://doi.org/10.14195/1647-7723>
- Lopes, A., & Vieira, H. (2002). A utilização de balões cativos para o estudo microclimático do bairro Lisboaeta de Telheiras. *Finisterra*, 37(74): 151–160.
- Marques, D. M. G. (2012). *Contributo da climatologia para a sustentabilidade urbana: o caso da Figueira da Foz*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.
- Matson, M., McClain, E. P., McGinnis, D. F., & Pritchard, J. A. (1978). Satellite Detection of Urban Heat Islands. *Monthly Weather Review*, 106(12): 1725–1734. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>
- Mendonça, L. V. (2005). Termografia por Infravermelhos. Aplicações em Edifícios. *Spy Building*: 53–57.
- Mendonça, L. V., Amaral, M. M. do, & Catarino, P. S. (2013). A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios. *Spy Building*, 23.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Monteiro, A. (1993). *O Clima Urbano Do Porto. Contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território*. Tese de doutoramento. Porto, 1993.
- Morais, L. (2011). *Distribuição Espacial da Mortalidade em Lisboa Associada às Temperaturas Elevadas , com Recurso a Sistemas de Informação Geográfica*. Dissertação de mestrado. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Nações Unidas. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision* (Vol. 12). New York. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>

Referências

- Nakata-Osaki, C. M., de Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2016). Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. *Ambiente Construído*, 73–87.
- Ndossi, M. I., & Avdan, U. (2016). Application of open source coding technologies in the production of Land Surface Temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. *Remote Sensing*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/rs8050413>
- Nouri, A. S. (2015). A Framework of Thermal Sensitive Urban Design Benchmarks: Potentiating the Longevity of Auckland's Public Realm. *Buildings*, 5(1): 252–281. <https://doi.org/10.3390/buildings5010252>
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates* (2nd Ed). Taylor & Francis e-Library. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2003.11.006>
- Oke, T. R. (2006). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. World Meteorological Organization.
- Oliveira, T. M. D. (2012). *Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Parlow, E. (2003). The urban heat budget derived from satellite data. *Geographica Helvetica*, 58(2), 99–111.
- Peres, L., Lucena, A., Rotunno Filho, O., & França, J. (2018). The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.012>
- Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4): 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>
- Rasul, A., Balzter, H., & Smith, C. (2015). Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14: 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.001>
- Salgueiro, T. B. (2002). Desenvolvimento Urbano de Lisboa. *Revista de Estudos Regionais*, (2º semestre), 7–22.
- Santamouris, M. (2006). *Environmental Design of Urban Buildings: An Integrated Approach*. Sterling, VA: Earthscan.
- Santamouris, M. (2007). Heat island research in Europe: The state of the art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1): 123–150. <https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687272>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103: 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Silva, D. D. S. (2012). *Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Referências

- Sousa, L. F. R. (2010). *Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.
- Su, T.-Y., Ho, W.-T., Chiang, S.-C., Lu, C.-Y., Chiang, H. K., & Chang, S.-W. (2017). Infrared thermography in the evaluation of meibomian gland dysfunction. *Journal of the Formosan Medical Association*, 116(7): 554–559. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2016.09.012>
- Susca, T., Gaffin, S. R., & Dell’Osso, G. R. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8–9): 2119–2126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8): 968–981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2012). *Landsat — A Global Land-Imaging Mission*. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012-3072. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0076>
- USGS. (2015). *Landsat—Earth observation satellites. Fact Sheet*. <https://doi.org/10.3133/fs20153081>
- Vieira, H., & Vasconcelos, J. (2003). Urban Morphology Characterisation To Include in a Gis for Climatic Purposes in Lisbon. Discussion of Two Different Methods., 4.
- Villena Del Carpio, J. A., Marinoski, D. L., Trichês, G., Lamberts, R., & de Melo, J. V. S. (2016). Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field. *Solar Energy*, 134: 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.044>
- Viveiros, R. R. (2017). *A influência da vegetação em pequenos espaços verdes na mitigação do efeito ilha de calor urbano em Lisboa*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114: 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>